

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Diplomski studij

ODREĐIVANJE DIELEKTRIČNE KONSTANTE
METODOM MJERENJA KAPACITETA PLOČASTOG
KONDENZATORA

Diplomski rad

Mario Srnović

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RELATIVNA DIELEKTRIČNA KONSTANTA	3
2.1. Polarizacija dielektrika	4
2.2. Metode za određivanje relativne dielektrične konstante	6
2.2.1. Metoda prijenosne linije i linije refleksije	6
2.2.2. Rezonantne šupljine	7
2.2.3. Metoda slobodnog prostora	9
2.2.4. Koaksijalna sonda	10
3. PLOČASTI KONDENZATOR	12
3.1. Nadomjesna shema kondenzatora	14
4. ODREĐIVANJE DIELEKTRIČNE KONSTANTE METODOM MJERENJA KAPACITETA PLOČASTOG KONDENZATORA	18
4.1. Opis mjernog sustava	18
4.2. Opis mjernih uređaja	19
4.3. Rezultati mjerenja	21
5. ZAKLJUČAK	62
SAŽETAK	64
LITERATURA	65
PRILOG	68
ŽIVOTOPIS	74

1. UVOD

Dielektrična svojstva i zanimanje za iste povijesno se povezuje sa razvojem električne opreme. Određivanje dielektričnih karakteristika materijala odnosno dielektrične konstante važno je za dizajniranje i kreiranje električnih krugova odnosno električne opreme [1]. Razvojem tehnologije i materijala koja se koriste u električnim krugove šireg frekvencijskog spektra (radio frekvencije, mikrovalovi i frekvencije mali valnih duljina) sve se više daje važnosti dielektričnoj konstanti [2]. To je važan faktor za definiranje fizičkih i kemijskih svojstava materijala vezano za skladištenje i disipaciju energije u različitim materijalima. [3] Također, dielektrična konstanta daje znanstvenicima i inženjerima vrijedne informacije kako bi određeni materijal bio pravilno iskorišten.

Postoje nekoliko tehnika ili metoda za određivanje dielektrične konstante ovisno o frekvencijskom području, primjeni, obliku i svojstvima materijala, točnošću. Tehnike su grupirane prema strukturi mjerenja a poznatije su kao „Metoda slobodnog prostora“ (*Free Space Method*), „Metoda prijenosne linije i refleksije“ (*Transmission line and Reflection*), „Rezonantne tehnike“ (*Resonant techniques*) [2]. Ove metode najviše se koriste za mikrovalno frekvencijsko područje dok se za niže frekvencije (do par GHz) koristi metoda mjerenja sa pločastim kondenzatorom. Ova metoda koristi se za frekvencijsko područje od 20 Hz do 1 GHz, ima visoku točnost mjerenja te ima vrlo jednostavnu pripremu i postavljanje [4].

Zadatak ovog rada je određivanje dielektrične konstante nekoliko različitih materijala (papir i prozirna folija) metodom mjerenja kapaciteta pločastog kondenzatora. Rezultati su obrađeni te su prikazani tablično i grafički.

Diplomski rad sastoji se od 5 poglavlja međusobno povezanih.

U prvom poglavlju uvodi se u tematiku i problematiku rada gdje su opisane važnost, metode i zadatak diplomskog rada.

U drugom poglavlju opisana je dielektrična konstanta, metode za određivanje dielektrične konstante.

Treće poglavlje opisuje pločasti kondenzatora sa nadomjesnim parametrima.

U četvrtom poglavlju opisan je mjerni sustav metode mjerenja kapaciteta pločastog kondenzatora, mjerni uređaji sa prigodnim ilustracijama te su obrađeni mjerni rezultati sa pripadnim grafovima.

U petom poglavlju je zaključak rezultata mjerenja.

Na kraju rada nalazi se popis literature, sažetak, prilog i životopis autora.

2. RELATIVNA DIELEKTRIČNA KONSTANTA

Materijali se općenito dijele na vodiče, poluvodiče i izolatore ili dielektrične materijale. Gledajući električna svojstva, dielektrični materijali ne provode struju ali kroz njih prolazi električno polje. Dielektrični materijali su dio električnih krugova pogotovo krugova visokih frekvencija čiji rad ovisi o dielektričnim svojstvima materijala. Za kreiranje visokofrekvencijskih krugova potrebno je dobro razumjeti dielektrična svojstva a pogotovo dielektričnu konstantu, realni dio kompleksne dielektričnosti, i tangens gubitaka u svim uvjetima rada. Za mjerenje kompleksnih dielektričnih svojstava materijala koriste se razne tehnike koje su ograničene određenim frekvencijama, materijalima i zahtjevima, pogotovo u radio i mikrovalnom frekvencijskom području [2].

Dielektričnost možemo zapisati u obliku:

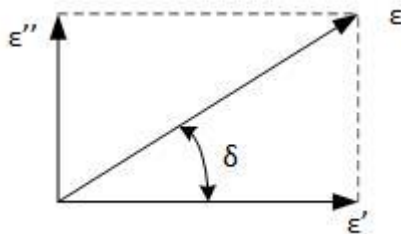
$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{-j\delta}, \quad (2-1)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0, \quad (2-2)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta, \quad (2-3)$$

gdje su ε' realni dio dielektričnosti, ε'' imaginarni dio dielektričnosti ili faktor gubitaka, ε_0 je dielektričnost vakuum ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m), δ je kut gubitaka a $\tan \delta$ je faktor disipacije D [5].

Kompleksna relativna dielektričnost sastoji se od realnog dijela, poznatiji kao relativna dielektričnost ε_r , te imaginarnog dijela ε'' koji predstavlja faktor gubitaka odnosno tangens gubitaka $\tan \delta$. Relativna dielektričnost predstavlja uskladištenu količinu energije iz vanjskog električnog polja dok faktor gubitaka predstavlja izgublenu ili disipiranu energiju koju materijal gubi pod utjecajem vanjskog polja [2]. Imaginarni dio kompleksne dielektričnosti ε'' je uvijek veći od nule i manji je od ε' [6].



Slika 1. Vektorski prikaz kompleksne dielektričnosti [6]

Na vektorskom prikazu dielektričnosti vidimo da su komponente fazno pomaknute za 90° te da rezultatni vektor sa realnom osi čini spomenuti kut δ .

Faktor disipacije možemo zapisati u obliku

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{izgubljena energije}}{\text{uskladištena energija}} \quad (2-4)$$

gdje su D faktor disipacije a Q faktor dobrote [6].

2.1. Polarizacija dielektrika

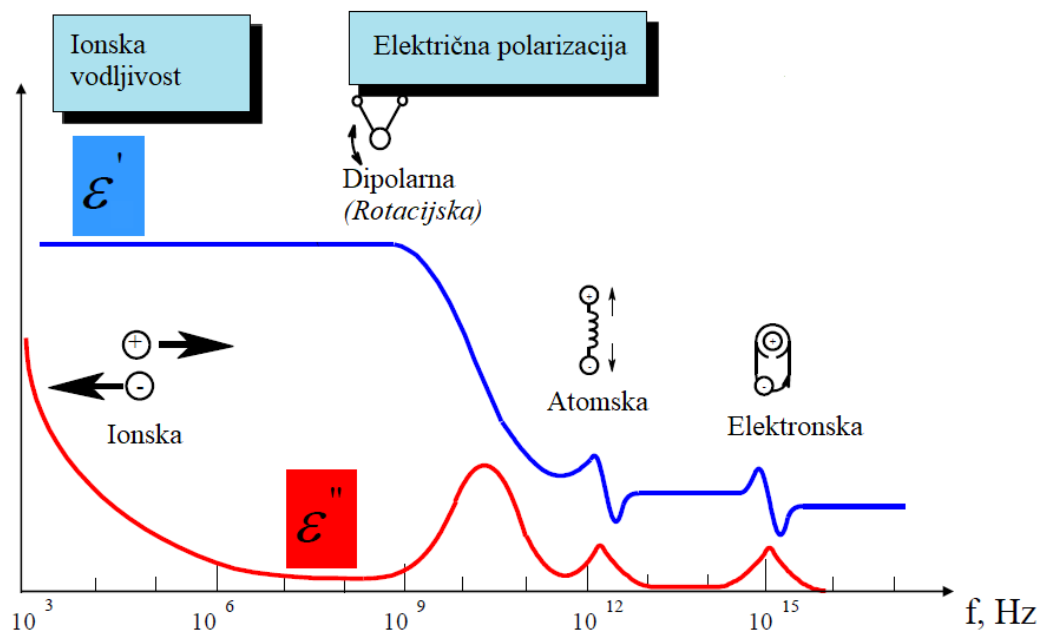
Osim frekvencije i temperature na dielektrična svojstva odnosno dielektričnu konstantu utječe i polarizacija. Kada na dielektrik djeluje električno polje dolazi do premještanja nosioca naboja unutar atoma, molekule ili iona. Rezultat polarizacije je stvaranje dipola a dielektrik postaje polariziran. Stvara se dipolni moment $p=\alpha E$ koji je istog smjera kao i električno polje, α je koeficijent polarizacije dielektrika a vrijednost mu ovisi o strukturi atoma. Porastom frekvencije zbog dipolnog učinka može doći do promjene dielektrične konstante ili ostaje stabilna, npr. dielektrična konstanta vode se znatno mijenja na frekvenciji od 22 GHz dok za teflon dielektrična konstanta ostaje nepromijenjena [2]. Postoje nekoliko vrsti polarizacija: dipolarna (orijentacijska), ionska, elektronska ili atomska polarizacija i dodirna polarizacija.

Orijentacijska polarizacija – uslijed formiranja molekule sastavljene od atoma koji dijele elektrone dolazi do preraspodjele elektrona i neravnoteže u distribuciji naboja stvarajući stalni dipolni moment. Pod utjecajem električnog polja uslijed okretnog momenta električnog dipola koji se okreće prema smjeru polja dolazi do orijentacijske polarizacije. [2] Trenje koje se javlja prilikom promjene smjera dipola povezano je sa gubicima dielektrika [6].

Ionska polarizacija – nastaje zbog pomaka pozitivnih i negativnih iona unutar kristalne rešetke pod djelovanjem električnog polja [2].

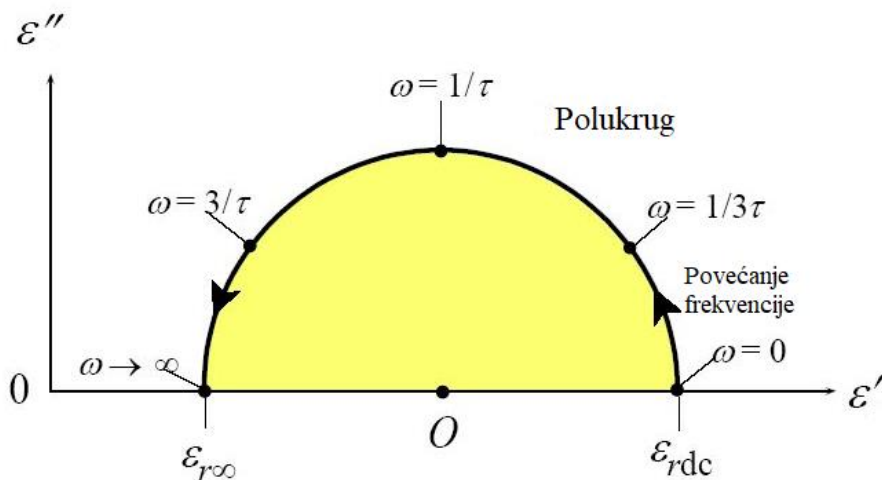
Elektronska polarizacija – polja javlja se uslijed pomaka elektrona u odnosu na jezgru atoma [6].

Dodirna polarizacija – javlja se uslijed pomaka nosioca naboja preko površine materijala te je otežano gibanje naboja, naboji se skupljaju na površini između dva materijala [2].



Slika 2. Vrste polarizacija ovisne o frekvenciji [7]

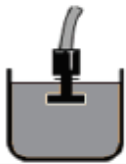
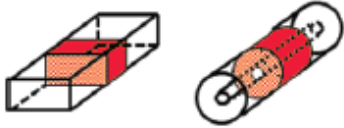
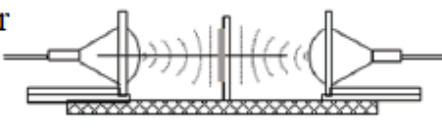
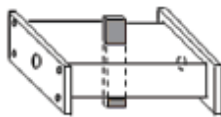
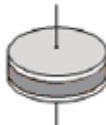
Kompleksna dielektričnost se može također prikazati u Cole-Cole dijagramu gdje se imaginarni dio ε'' crta na vertikalnu os a realni dio ε' na horizontalnu os sa frekvencijom kao neovisni parametar. Kod materijala koji imaju jedinstvenu frekvencije relaksacije rezultat je polukrug sa središtem u $\varepsilon'' = 0$ a maksimumom u točki $1/\tau$. Materijali sa višestrukim frekvencijama relaksacije rezultat je krug ili luk sa središtem u $\varepsilon'' = 0$ [6].



Slika 3. Cole Cole dijagram [13]

2.2. Metode za određivanje relativne dielektrične konstante

Za mjerenje relativne dielektrične konstante postoje nekoliko mjernih tehnika koje se dijele na metodu slobodnog prostora (*Free space Method*), metoda prijenosne linije i refleksije (*Transmission Line and Reflection*), i rezonantne tehnike (*Resonant techniques*) [2]. Odabir mjerne tehnike ovisi o nekoliko faktora kao što su frekvenijski opseg, očekivana vrijednost relativne dielektrične konstante i permeabilnosti, potrebne točnosti, svojstvima materijal, obliku materijala (tekućina, prah, čvrsto stanje), ograničenom broju uzoraka, kontaktnoj ili nekontaktnoj metodi, temperaturi, trošku [4].

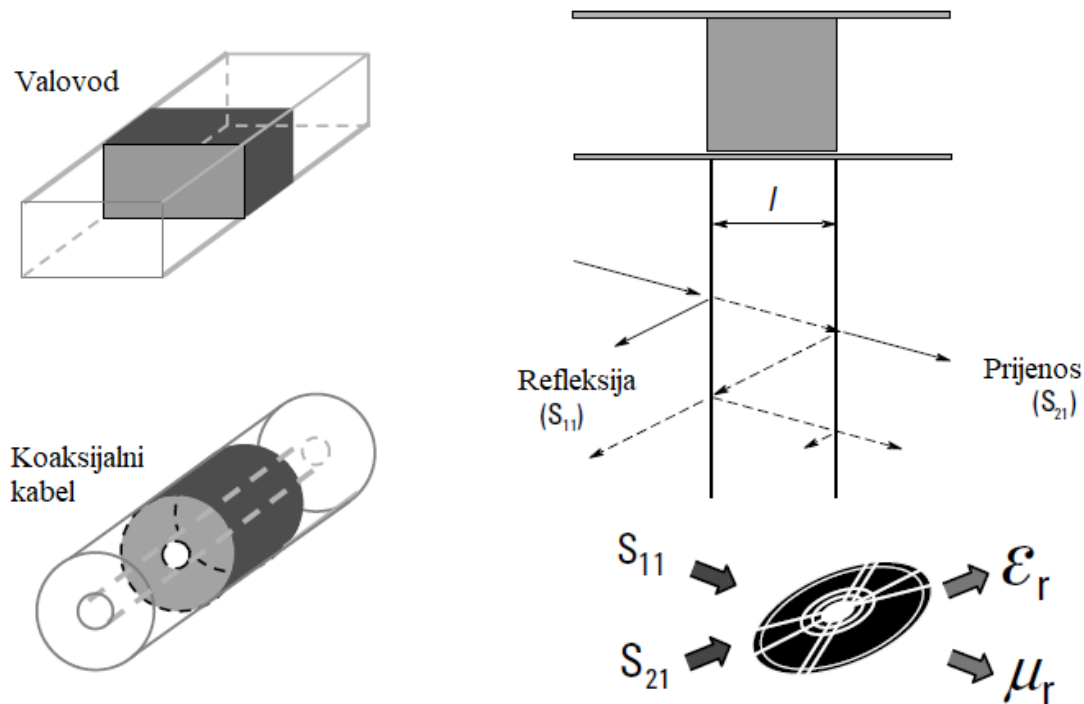
Koaksijalna sonda ϵ_r		Široki frekvenijski spektar; nedestruktivna metoda; prikladna za materijale sa velikim gubicima; tekućine i čvrste tvari
Prijenosna linija $\epsilon_r \quad \mu_r$		Široki frekvenijski spektar Prikladna za materijale sa velikim i malim gubicima; obrađive krutine
Slobodni prostor $\epsilon_r \quad \mu_r$		Široko frekvenijski spektar; beskontaktna metoda Prikladna za ravne površine i prah; visoka temperatura
Rezonantne šupljine ϵ_r		Jedna frekvencija; točna metoda Prikladna za materijale sa malim gubicima; mali uzorci
Pločasti kondenzator ϵ_r		Točna metoda Prikladna za niže frekvencije; tanki i ravni uzorci

Slika 4. Prikaz mjernih tehnika za određivanje parametara materijala [4]

2.2.1. Metoda prijenosne linije i linije refleksije

Kod ove metode dielektrični materijal se postavlja unutar prijenosne linije gdje je EMV usmjeren na uzorak. Uzorak se postavlja unutar valovoda ili koaksijalnog voda te se pomoću vektorskog mrežnog analizatora (VNA) mjere raspršujući parametri. Matematičkim proračunom se iz izmjerenih reflektiranih signala (S_{11} i S_{22}) te prijenosnih signala (S_{21} i S_{12}) dobiju vrijednosti dielektričnosti ϵ_r i permeabilnosti μ_r . Mjerenja zahtijevaju određene pripreme kao što je čvrsto postavljanje uzorka u

valovod i koaksijalnu liniju. Za točnija mjerenja unutar uzorka potrebno je maksimalno moguće električno polje, radi se i kalibracija u prijenosnoj liniji koristeći otvoreni krug, kratki spoj ili otpor od $50\ \Omega$ kao teret [2].



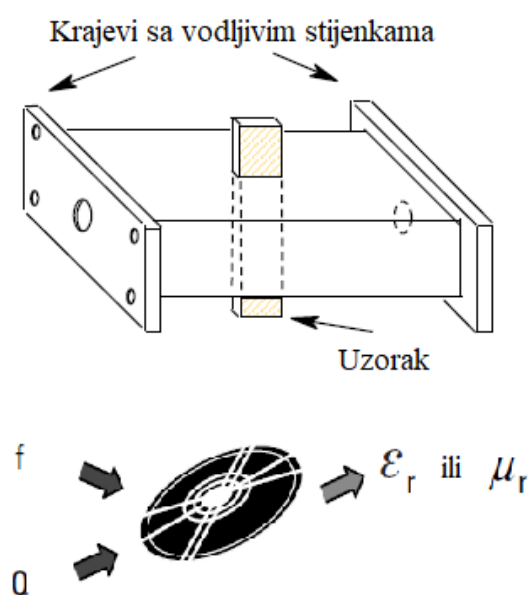
Slika 5. Prikaz metode prijenosne linije [6]

Prednosti ove metode je dobivanje vrijednosti za dielektričnost i permeabilnost materijala, jednostavnost postupka, široki frekvencijski spektar (100 MHz – 110 GHz), može se prilagoditi za mjerenje u vakuumu [7]. Nedostaci su da točnost mjerenja ovisi o učinku zračnog jastuka, ne može se koristiti na frekvencijama manjih od 100 MHz dok na frekvencijama većim od 10 GHz je nemjerljiva metoda zbog parazitnih gubitaka na većim frekvencijama, potreban precizan oblik uzorka, ograničena rezolucija za manje gubitke [2][7].

2.2.2. Rezonantne šupljine

Rezonantne metode imaju točnija mjerenja ali imaju ograničenja u vidu manjeg frekvencijskog područja te su predviđene za materijale sa manjim gubicima. One obuhvaćaju nekoliko područja mjeriteljstva rezonantnih tehnika kao što su *dielektrična sonda*, *rezonator šupljina/dielektrični rezonator* i *otvoreni rezonatori*. Ima nekoliko tehnika koje se koriste a najčešća je *metoda perturbacije*

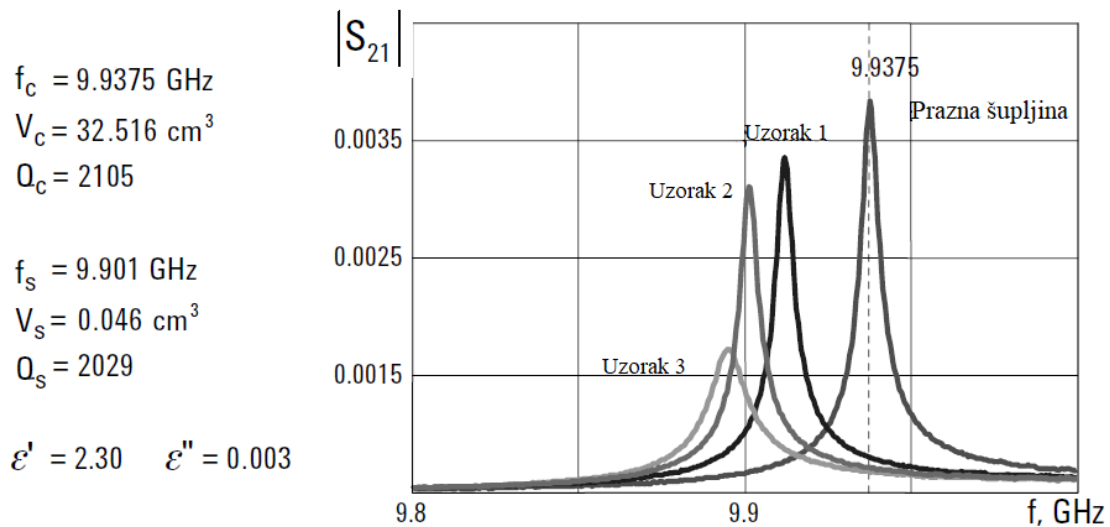
kod rezonantnih šupljina. Metoda perturbacije pogodna je za sva dielektrična mjerenja, za magnetske materijale te mjerenja materijala sa srednjim i velikim gubicima [2]. Za mjerenje dielektrične konstante postava je jednostavna te su potrebni mrežni analizator, šupljina, odgovarajuća programska podrška te računalo za proračun. Kod mjerenja rezonantnih šupljina uzorak materijala se postavlja u središte pravokutnog valovoda sa vodljivim stijenkama na mjesto sa najvećim električnim ili magnetskim poljem. Promjenom frekvencije i faktora dobre Q te računalnim proračunom dolazi se do dielektričnih ili magnetskih svojstava materijala. Potreban je mali broj uzoraka što za posljedicu ima manjih pomaka u frekvenciji [6].



Slika 6. Prikaz rezonantne šupljine [6]

Na slici 7 prikazani su rezultati mjerenja sa 3 različita uzorka unutar šupljine gdje se vidi rezonantna frekvencija i frekvencije uzoraka. Veličina šupljine se modelira prema frekvenciji i to obrnuto proporcionalna, što je veća frekvencija manja je šupljina. Svaka šupljina se kalibrira ali su proračuni vrlo brzi tako da se može u kratko vrijeme izračunati dielektričnost za veći broj uzoraka [8]. Kada se stave uzorci širi se magnetna rezonantna krivulja što rezultira manjim faktorom dobrote. Frekvencija je na x-osi dok je na y-osi amplituda koeficijenta linearnog prijenosa $|S_{21}|$ kojeg izmjerimo preko mrežnog analizatora. Iako su vrlo točni imaju nedostatak što mrežni analizatori moraju imati dobru rezoluciju kako bi pratili male promjene faktora dobrote, dimenzije presjeka uzorka moraju biti precizne, može doći do pogreške u aproksimaciji, ograničeni su na uzorke sa malim gubicima (manji

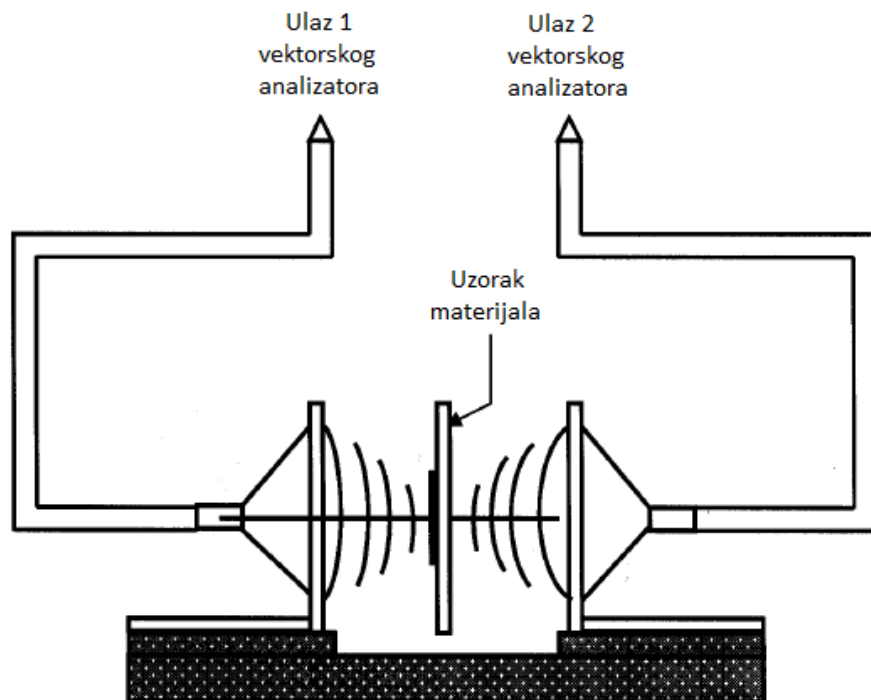
faktor dobrote Q) i praznog pravokutnog valovoda. Cilindrični valovodi su još precizniji jer imaju veći faktor dobrote ali nedostatak je u otežanom konstruiranju ovakvog valovoda [6].



Slika 7. Prikaz rezultata mjerenja šupljina sa različitim uzorcima [6]

2.2.3. Metoda slobodnog prostora

Metoda slobodnog prostora je beskontaktna metoda za precizna mjerenja pri širokom frekvencijskom području. Priprema postave je jednostavna a sastoji se od mrežnog vektorskog analizatora, mjernog pribora (antene, tuneli, lukovi), programske podrške i računala [6]. Mogu se implementirati u industrijske aplikacije i postrojenja za kontinuirano praćenje i kontrolu određenih svojstava materijala, te za širokopojasne aplikacije u TEM načinu prostiranja vala [2][8]. Metoda je pogodna za određivanje svojstava materijala pri visokim temperaturama i za nehomogene dielektrike [8]. Kalibracija vektorskoga analizatora može biti jednostavna ili kompleksna a ovisi o prikladnim uvjetima i željenoj točnosti. Koriste se nekoliko metoda kalibracije: GRL (*Gated Reflected Line*), TRM (*Thru Reflected Match*), TRL (*Thru Reflected Line*) te LRL (*Line Reflect Line*) koja daje najbolju kvalitetu kalibracije [6].



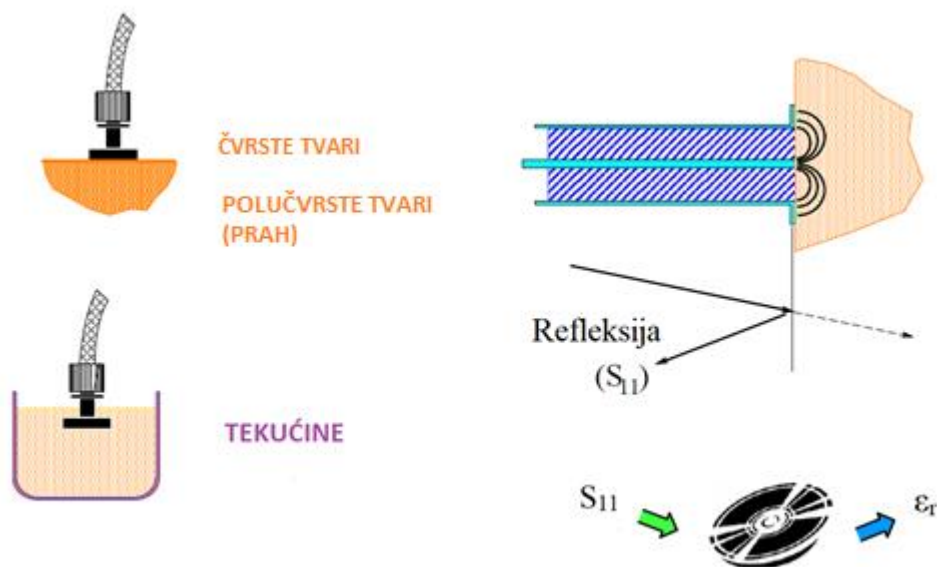
Slika 8. Shematski prikaz metode slobodnog prostora [8]

Uzorak se stavlja između odašiljačke i prijemne antene, koje su spojene na mrežni vektorski analizator, te se mjere pojačanje i fazni pomak mjerenog signala [8]. Prvo se mjeri S-parametri bez uzorka a zatim sa uzorkom te se koeficijenti refleksije i prijenosa preko programske podrške i računala pretvaraju u dielektrična svojstva. Uzorak mora biti velik i ravan a glavni izvori pogreške su višestruke refleksije između antena i površine uzorka, neusklađenost uzoraka i difrakcija na rubovima. Prednosti ove metode su da se može koristiti za visokofrekvencijska mjerenja, ispitivanje materijala bez oštećenja, mjerenje uzorka u nepogodnim uvjetima (visoka temperatura), mogu se mjeriti električna i magnetska svojstva. Nedostaci metode slobodnog prostora su što je potreban veliki i ravan ispitivani uzorak materijala, moguće su višestruke refleksije između antena i površine uzorka te difrakcije na rubovima uzorka [2].

2.2.4. Koaksijalna sonda

Metoda sa koaksijalnom sondom je jednostavna, nedestruktivna i širokopolasna metoda idealna za mjerenje različitih vrsta materijala kao što su čvrste tvari i tekućine [2]. I dok većina metoda koristi pojedinačne frekvencije za ispitivanje, metoda za koaksijalnom sondom može ispitivati uzorak kroz široki spektar frekvencija koji je od 500 MHz do 110 GHz [8]. Postava za ispitivanje uzorka sastoji

se od mrežnog ili analizatora frekvencije, koaksijalne sonde i programske podrške [6]. Kod ispitivanja sonda sa senzorom na vrhu se postavlja se na površinu ispitivanog materijala ili se uranja, ukoliko je riječ o tekućinama. Mjere se koeficijenti reflektiranog signala S_{11} te se iz faze i amplitude signala izračunavaju dielektrična svojstva ispitivanog materijala [8]. Potrebna je kalibracija senzora na vrhu sonde te ne smiju biti zračni jastuci na mjestu dodira. Zračni jastuci ili mjehurići kod tekućina glavni su uzročnici pogrešaka uz nestabilnost kabela i debljine uzoraka. Kod mjerenja zahtijeva se određena debljina uzorka kako ne bi došlo do raspršivanja vala iz koaksijalne sonde [6]. Pogreške se javljaju na nižim i višim frekvencijama kao i pri malim vrijednostima dielektrične konstante i faktora gubitaka. Metoda je optimalna za materijale sa faktorom gubitaka većim od 1 pri frekvenciji od 915 do 2450 MHz. Metoda sa koaksijalnom sondom je modificirana metoda prijenosne linije, jednostavna je za korištenje ali sa limitiranom točnošću i ponovljivosti [8].



Slika 9. Metoda koaksijalne sonde [7]

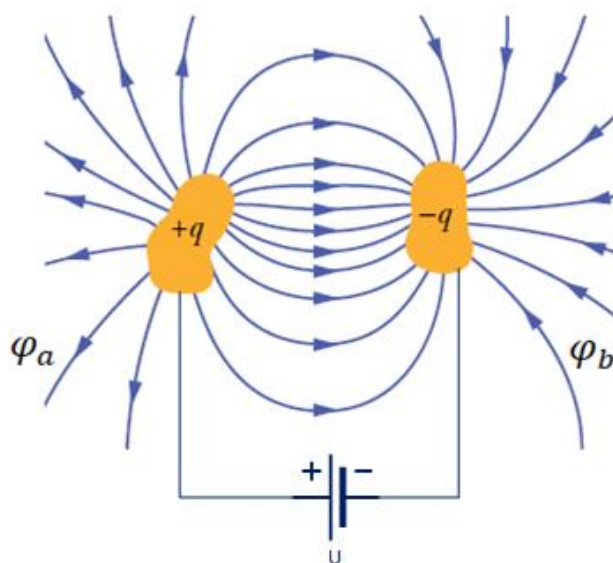
3. PLOČASTI KONDENZATOR

Prije upoznavanja s pločastim kondenzatorom, potrebno je uvesti nekoliko pojmova vezano za navedeni element. Električni kapacitet usamljenog vodljivog tijela definira se kao omjer električnog naboja naelektriziranog tijela i potencijala tog tijela odnosno;

$$C = \frac{Q}{\varphi} [F] \quad (3-1)$$

Jedinica za kapacitet je Farad (1 F) koja vrlo velika i rijetko se koristi u praksi gdje su uobičajene vrijednosti mF , μF , nF pa čak i pF .

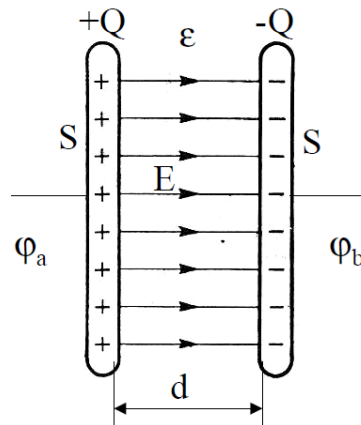
Ukoliko se koriste dva vodljiva tijela koja su priključena na izvor napona, količina naboja ova dva tijela biti će jednaka razlici potencijala između njih $\varphi_a - \varphi_b = U$ (slika 10).



Slika 10. Naboji priključeni na izvor napajanja [10]

Koeficijent proporcionalnosti odnosno kapacitet dvaju izoliranih tijela u tom slučaju će biti [9]

$$C = \frac{Q}{U} [F] \quad (3-2)$$

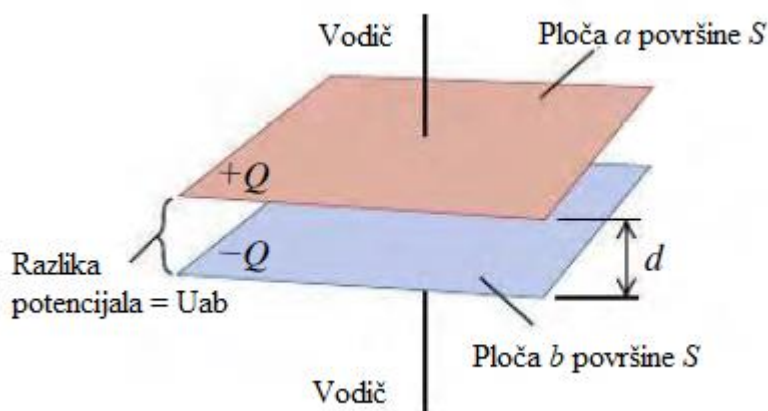


Slika 11. Kapacitet dviju vodljivih ploča [11]

Prema slici 11 koristeći Gaussov zakon za homogeno električno polje $q = \epsilon_0 ES$ i razlike potencijala između naelektriziranih ravnina $U_{ab} = Ed$ te uvrštavanjem ova dva izraza u izraz (3-2) dolazimo do formule sa kapacitet pločastog kondenzatora [10].

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \cancel{E} S}{\cancel{E} d} = \epsilon_0 \frac{S}{d} [F] \quad (3-3)$$

Pločasti kondenzator sastoji se od dvije jednako nabijene ploče površine S paralelno razmaknute na udaljenosti d , slika 12. Prema relaciji (3-3) kapacitet kondenzatora ovisi proporcionalno o površini ploča S a obrnuto proporcionalno o razmaku između ploča d . Također, kapacitet kondenzatora ovisi i o vrsti materijala između ploča što je određeno relativnom dielektričnom konstantom za koju se povećava kapacitet kondenzatora [12].



Slika 12. Pločasti kondenzator [12]

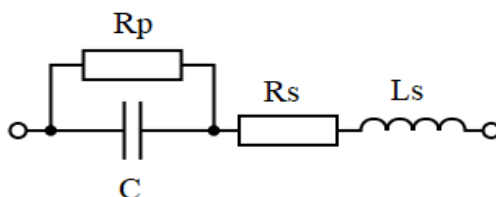
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} [F] \quad (3-4)$$

gdje su: ε_0 = dielektričnost vakuumu ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m); ε_r = relativna dielektričnost, S = površina ploča (m^2) i d = udaljenost između ploča (m).

Ovaj izraz se često koristi kako bi se izračunao kapacitet koji se nešto razlikuje od stvarnog kapaciteta zbog nehomogenog polja na rubovima ploča. Iako postoje rješenja kojima se može smanjiti rubni efekt, ova greška se može zanemariti jer su ploče puno veće od udaljenosti d . Razmak između ploča određuje dozvoljeni napon tako da se smanjenjem razmaka smanjuje i dozvoljeni naponi koji se može priključiti između ploča kondenzatora [9].

3.1. Nadomjesna shema kondenzatora

Teorijski gledano kondenzator se smatra idealnim elementom koji skladišti energiju bez gubitaka. Međutim, realni kondenzatori imaju parazitne elemente koji znatno utječu na karakteristike i rad samog kondenzatora a ovise o vrsti materijala od kojih je napravljen kondenzator te načinu izrade [15]. Na slici 15 je nadomjesna shema realnog kondenzatora gdje su prikazani serijski otpor R_s , serijski induktivitet L_s i paralelni otpor R_p .



Slika 13. Nadomjesna shema realnog kondenzatora [14]

Serijski otpor R_s predstavlja otpor vodljivih dijelova kondenzatora kao što su vodiči, kontakti spojevi i elektrode između kojih je izolator. Ima malu vrijednost, reda $m\Omega$ te ovisi o vršnoj vrijednosti struje [15]. Paralelni otpor R_p predstavlja otpor izolacije odnosno otpor i gubitke dielektričnog materijala. Zbog neidealnog dielektrika dolazi do proboja elektrona kroz medij te će poteći mala istosmjerna struja otjecanja I_{so} (nA) koja je ekvivalentna velikom otporu $R_p = U/I_{so} [M\Omega]$.

Ukupni ili ekvivalentni serijski otpor *ESR* kondenzatora koji predstavlja gubitke u kondenzatoru sastoji se od otpora vodljivih dijelova kondenzatora i otpora izolacije odnosno dielektrika. Na višim frekvenciji može se zanemariti R_P tako da otpor vodljivih dijelova predstavlja ukupne gubitke kondenzatora [16]. *ESR* se opire prolaskom struje rezultirajući disipacijom snage odnosno porastom temperature što utječe na vijek rada kondenzatora

$$P = I_{\text{rms}}^2 * ESR \text{ [W]} \quad (3-5)$$

ESR je mali otpor vrijednosti od nekoliko $\text{m}\Omega$ ali važan parametar koji govori o gubicima u kondenzatoru [15]. Proizvođači ne daju izravno i konkretan podatak o *ESR* nego do njega dolazimo preko formule za faktor disipacije [17]:

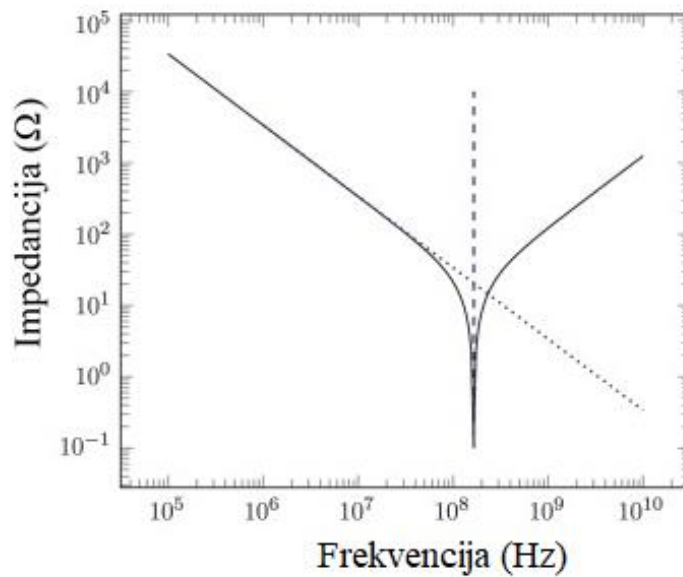
$$D = \frac{ESR}{X_C} = ESR \cdot \omega C \rightarrow ESR = \frac{D}{\omega C} \quad (3-6)$$

Induktivitet L_S ili ekvivalentni serijski induktivitet *ESI* posljedica je postojanja metalnih dijelova (kućište, kontakti, žice) u kondenzatoru i utječe na rad kondenzatora iako se radi o malim vrijednostima induktiviteta. Vrijednosti se kreću od nekoliko nH dok nekoliko stotina nH ovisno o izvedbi kondenzatora. Induktivitet se može smanjiti dizajniranjem podnožja, rasporedom elemenata unutar kondenzatora, lakiranjem krajnjih kontakata te predstavlja konstantan izazov za dizajnere u izradi kondenzatora. Ekvivalentni serijski induktivitet predstavlja problem na višim frekvencijama zbog svoje reaktancije koja se opire prolasku struje [18].

Impedancija realnog kondenzatora dana je izrazom:

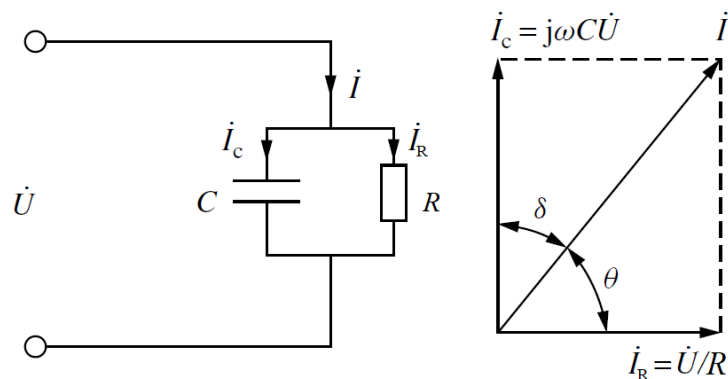
$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3-7)$$

Na višim frekvencijama dominira induktivna reaktancija pa se kondenzator ponaša kao zavojnica. Smanjivanjem frekvencije do točke rezonantne frekvencije gdje su izjednačeni kapacitivna i induktivna reaktancija $X_L = X_C$, ukupna impedancija je jednaka *ESR* tako da se kondenzator ponaša kao čisto ohmski otpor, slika 14. Preporuča se rad kondenzatora u frekvencijskom opsegu daleko ispod rezonantne frekvencije zbog smanjenja gubitaka odnosno pojave velike struje u induktivnoj petlji pražnjenja. Kondenzator može imati više rezonantnih frekvencija što ovisi od geometrijskoj konstrukciji i karakteristikama prijenosnih linija (vodiča) unutar kondenzatora [15].



Slika 14. Ovisnost impedancije o frekvenciji realnog kondenzatora [23]

Dielektrična konstanta pločastog kondenzatora može se odrediti mjerenjem kapaciteta kondenzatora bez dielektrika odnosno kapacitet pločastog kondenzatora sa vaakumom prema formuli $C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}$. Umetanjem dielektrika povećava se kapacitet za relativnu dielektričnu konstantu medija te se izračunava prema formuli $C = \epsilon' \frac{S}{d}$ gdje je ϵ' realni dio dielektrične konstante dok se istovremeno javljaju i gubici energije jer medij nije savršeni izolator [19]. To se najbolje može predočiti bilo serijskom ili paralelnom kombinacijom otpora i kondenzatora. Na slici 15a prikazana je paralelna kombinacije otpora i kondenzatora gdje otpor predstavlja komponentu gubitaka preko struje I_R koja se javlja uz struju I_C [20]. Struja gubitaka se može javiti zbog migracije iona ili uslijed uskraćivanja induciranih dipola u materijalu da prate ili se ravnaju prema primijenjenom električnom polju [17]. Dielektričnu konstantu ili permitivnost možemo izračunati preko dobivenih kapaciteta C i C_0 odnosno $\epsilon = C/C_0$ [12].



Slika 15. a) Nadomjesna shema realnog kondenzatora; b) fazorski dijagram struja realnog kondenzatora [17]

Struja gubitaka I_R je jednaka $I_R = \frac{\dot{U}}{R}$ dok je struja čiste kapacitivne komponente $I_C = j\omega C\dot{U}$ tako da je ukupna struja $I = I_C + I_R = j\omega C\dot{U} + \dot{U}/R$ što se može prikazati i na fazorskom dijagramu, slika 15b. Na fazorskom dijagramu prikazani su i fazni kut θ te kut gubitaka δ . Već je ranije spomenuto da je faktor disipacije D definiran kao $\tan\delta$ odnosno $D = \tan\theta = \tan\delta = \frac{1}{\omega CR}$ [17].

Metoda sa pločastim kondenzatorom koristi se za mjerenje dielektrične konstante pri nižim frekvencijama, obično niže od 1 GHz, odnosno u rasponu od 20 MHz do 1 GHz. Pri mjerenju se koriste dvije paralelne ploče između koji se postavlja uzorak, izolator koji može biti različite teksture i materijala. Relativna dielektričnost se izračunava preko kapaciteta C ili faktora gubitaka D koji se prethodno mjere analizatorom impedancije ili LCR-metrom. Metodu sa pločastim kondenzatorom ne zahtijeva skupocjenu opremu i instrumente, jednostavno se postavlja i vrlo je točna ($\pm 1\%$ pri nižim frekvencijama i $\pm 8\%$ pri višim frekvencijama za ϵ_r) [4]. Nedostaci ove metode su relativno mali frekvencijski spektar mjerenja, uzorak ima određene zahtjeve (ravna i glatka površina kod čvrstih materijala) [7]. Mjerenje relativne dielektrične konstante pločastim kondenzatoru objašnjeno ju u sljedećem poglavlju.

4. ODREĐIVANJE DIELEKTRIČNE KONSTANTE METODOM MJERENJA KAPACITETA PLOČASTOG KONDENZATORA

4.1. Opis mjernog postava

Pločasti kondenzator često se primjenjuje u eksperimentalnim mjerenjima prvenstveno zbog svoje jednostavnosti. Postave eksperimentalnih pokusa su vrlo jednostavne i jeftine te ne zahtijevaju skupocjenu opremu i instrumente. Pločasti kondenzator korišten u mjerenjima sastoji se od dvaju bakrenih diskova promjera 20 cm, debljine 1 mm. Između ploča diska kao izolator su korišteni uredski papir „euroBASIC“ proizvođača MONDI gramature 80 g/m² i debljine 100 μm te folija od termoplastičnog polimera debljine 100 μm, slika 16. Debljina papira i folije mjerena je pomoću mikrometarskog vijka 0-25 mm sa točnošću 0.05 mm te izmjerene vrijednosti odgovaraju debljinama koje je propisao proizvođač. Kako bi se smanjili zračni jastuci između ploča kondenzatora i papira dodatno su korišteni drvene obloge i stege koje su bile pričvršćene na diskove kondenzatora, slika 17.



Slika 16. Prikaz pločastog kondenzatora sa folijom od termoplastičnog polimera



Slika 17. Stabilizacija pločastog kondenzatora drvenim oblogama i stegom

Mjerenje kapaciteta i ostalih mjernih veličina obavljeno je pomoću uređaja za mjerenje kapaciteta, induktiviteta, otpora, impedancije i ostalih veličina. Radi se o uređajima UNIT 612 LCR metra (slika 18a) i GW Instek 816 LCR (slika 18b) prikazani na slikama sa pripadnim karakteristikama i značajkama. Papir i folija stavljeni su između dva diska te su pomoću uređaja mjereni kapacitet (C_s , C_P), induktivitet (L_s , L_P) i otpor (R_s , R_P) u serijskom odnosno paralelnom načinu mjerenja. Osim ovih osnovnih veličina još su mjereni faktor dobrote Q , faktor disipacije D i kut faznog pomaka θ .

4.2. Opis mjernih uređaja

Za eksperimentalna mjerenja, kao što je navedeno ranije, korištena su dva uređaja UNIT 612 LCR metar i GW Instek 816 LCR metar. UNIT-ov 612 LCR metar konstruiran je za mjerenje kapaciteta, induktiviteta i otpora te njihovih pripadnih veličina kao što su faktor dobrote Q , faktor disipacije D i kut faznog pomaka θ . Uređaj koristeći serijski i paralelni način rada može mjeriti na više frekvencija: 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz. Odlikuje se dualnim prikazom 19999/1999, HID sučeljem za USB, snimanje rezultata pomoću računala te malom potrošnjom do 15 mA. Opseg induktiviteta koji može mjeriti je od 20 mH – 2000 H uz točnost 0.5%, kapaciteta 200 pF – 20 mF uz točnost 0.5% te otpora 20 Ω - 200 M Ω uz točnost 0.3%. Prilikom mjerenja koristi se efektivni napon od 0.6 V, izlazna impedancija je 120 Ω te ima mogućnost automatskog isključivanja. Uređaj prije mjerenja

izvršava kalibraciju otvorenog i kruga kratkog spoja. Kod kalibracije otvorenog kruga smanjuje se utjecaj distribuiranih kapaciteta i otpora testnih vodiča prilikom mjerenja elemenata visoke impedancije. Kalibracijom kruga kratkog spoja smanjuje se utjecaj otpora na kontaktima i testnim vodičima prilikom mjerenja elemenata niske impedancije [21].



Slika 18. a) Unit 612 LCR, b) GW Instek 816 LCR

GW Instek 816 LCR je visoko precizni uređaj za mjerenje primarnih parametara kao što su otpor, kapacitet, induktivitet te sekundarnih faktora dobrote, faktor disipacije i kut faznog pomaka. Uređaj ima veliki prikaz na kojem se mogu očitavati dvojna mjerenja te postavke parametara. Primjenjiv za istraživačka i razvojna mjerenja koja zahtijevaju visoku točnost i brze rezultate mjerenja. Opseg ispitnih frekvencija je od 100 Hz do 2 kHz promjenjiv u 245 koraka, razina napona je promjenjiva od 0.1 V do 1.275 V u koracima od 5mV. Može mjeriti sa serijski i paralelnim nadomjesnim krugovima gdje su kombinacije mjerenja L/R, L/Q, C/D, C/R, R/Q i Z/ θ . Za mjerenja se koristi Kelvinov most sa 4 priključka te je prije mjerenja potrebno napraviti kalibraciju otvorenog kruga i kratkog spoja. Osnovna točnost uređaja je 0.1% pri najmanjoj brzini očitavanja, pri srednjoj brzini je točnost 0.2% dok je pri najvećim brzinama očitavanja točnost 0.48%. Uređaj ima 100 memorijskih blokova za spremanje postavki te ima mogućnost spajanja na računala putem RS232 priključka. Pomoću prikladnog programa moguće je upravljati uređajem i snimati rezultate putem računala [22].

Ostale specifikacije i karakteristike uređaja opisana su u prilogu.

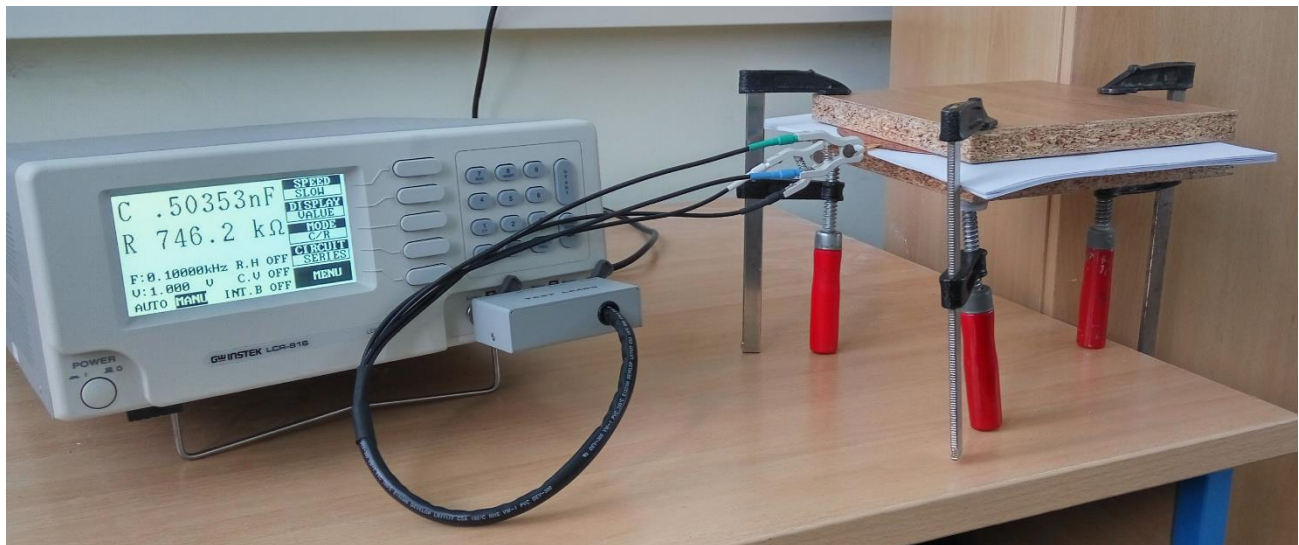
4.3. Rezultati mjerenja

Mjerenja kapaciteta, otpora, induktiviteta i ostalih mjernih veličina odrađeno je laboratoriju za visoko frekvencijska mjerenja pri sobnoj temperaturi. Pločasti kondenzator sastavljen je od bakrenih diskova promjera $d=10$ cm a kao dielektrik korišteni su papir i termoplastična folija. Pri stabilizaciji kondenzatora te zbog smanjenja zračnih jastuka korišteni su drvene obloge i stege. Mjerenja su obavljena pomoću uređaja za mjerenje induktiviteta, kapaciteta i otpora proizvođača UNI-T modela UT612 i GW Instek model LCR-816. Mjerenja su izvršena u frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 100 kHz za različite vrijednosti kapaciteta odnosno razmaka između ploča d . Kapacitet kondenzatora mijenjao se dodavanjem broja papira ili folije tako da su napravljena mjerenja za razmak između ploča od $d_1 = 0.0001$ m (1 komad papira/folije) do $d_5 = 0.01$ m (100 komada papira/folije). Dielektrična konstanta je određena prema formuli [5]

$$\varepsilon_r = \frac{C_P \cdot d}{S \cdot \varepsilon_0} \quad (4-1)$$

gdje su ε_0 = dielektričnost vakuumu ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m); C_P = kapacitet pločastog kondenzator (F), S = površina ploča (m^2) i d = udaljenost između ploča (m).

Postupak mjerenja kapaciteta pločastog kondenzatora pomoću GW Instek LCR-816 uređaja prikazan je na slici 19.



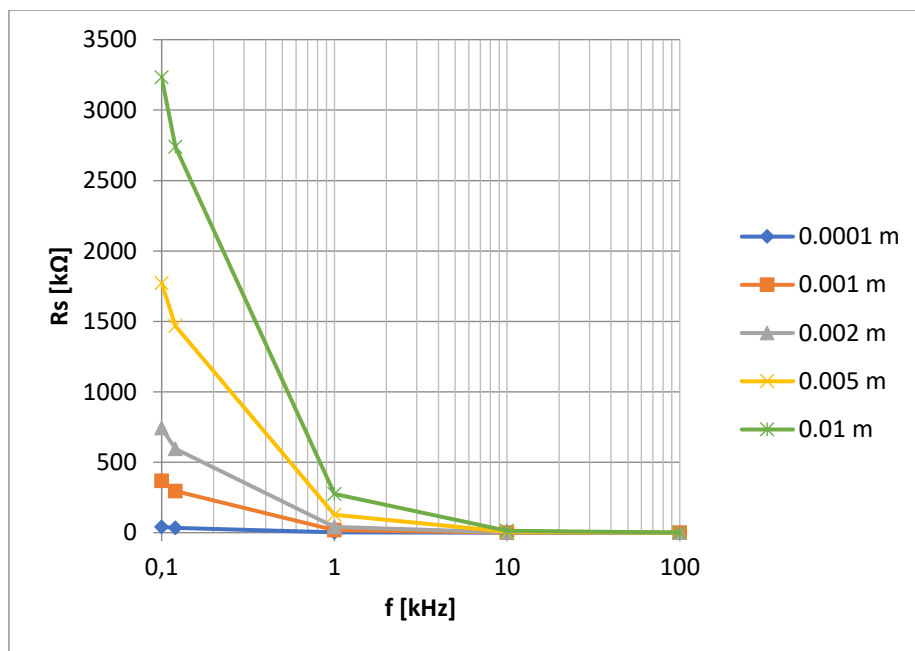
Slika 19. Prikaz mjerenja kapaciteta pločastog kondenzatora u laboratoriju

Tablice i grafovi mjerenja parametara pločastog kondenzatora mjernim uređajima UT612 i GW Instek LCR-816

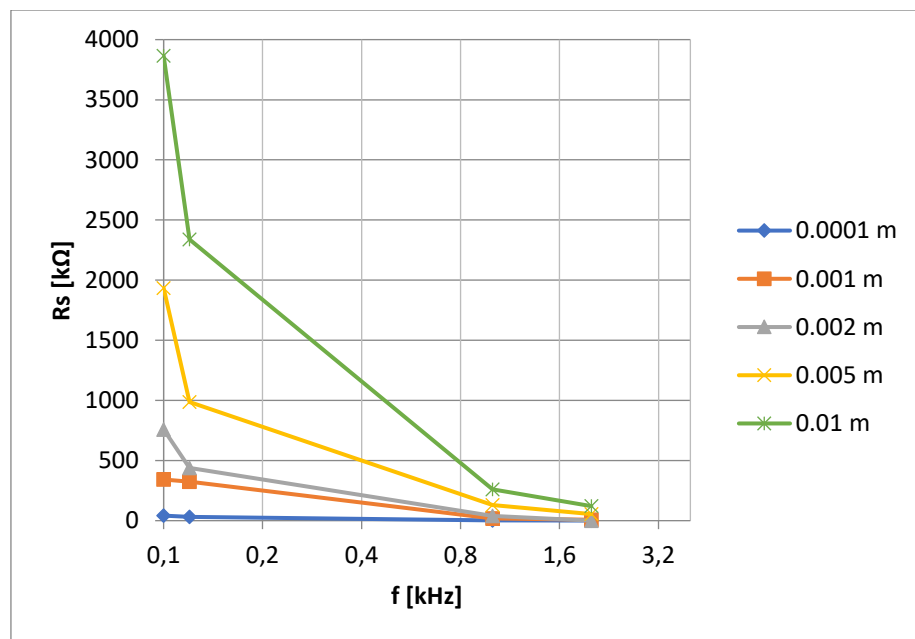
Rezultati mjerenja prikazani su tablično i grafički za svaki pojedini parametar kondenzatora izmjeren u dva načina rada, serijskom i paralelnom te za dvije vrste dielektrika, papira i folije od termoplastičnog polimera. U tablici su prikazani rezultati za isti parametar izmjereni sa UT612 i GW Instek LCR-816 mjernim uređajima. Na lijevoj strani tablice nalaze rezultati mjereni UT612 dok su na desnoj strani rezultati izmjereni GW Instek LCR-816 uređajem. Isto tako prvo su prikazani grafovi iz tablice rezultata izmjeren UT612 uređajem a ispod su prikazani rezultati iz tablice izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem. Prvo su obrađeni rezultati za pločasti kondenzator sa dielektrikom od papira a zatim pločasti kondenzator sa folijom od termoplastičnog polimera kao dielektrik.

Tablica 1. Serijski otpor R_s pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT 612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Rs [kΩ]					f [kHz]	Rs [kΩ]				
	d1 0.0001 m	d2 0.001 m	d3 0.002 m	d4 0.005 m	d5 0.01 m		d1 0.0001 m	d2 0.001 m	d3 0.002 m	d4 0.005 m	d5 0.01 m
0.1	41.14	368	742.7	1772.5	3233	0.1	41.88	342.3	758.4	1935	3866
0.12	33.31	295.8	596.2	1468.7	2739	0.12	32.84	323	439.5	987.6	2338
1	2.262	19.46	40.22	126.5	274.4	1	2.218	19.44	40.75	129.4	259.4
10	0.1071	0.957	1.9007	6.672	14.373	2	0.8904	7.7664	0.01644	54.54	120.9
100	0.006454	0.05606	0.11818	0.395	0.8898						



Slika 20. Serijski otpor R_s pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



Slika 21. Serijski otpor R_s pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

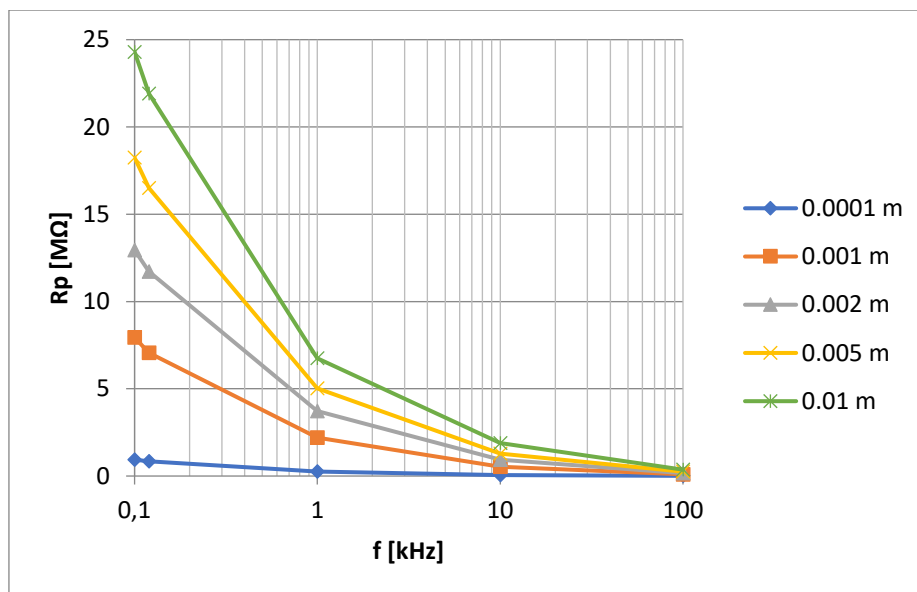
Gledajući tablice i grafove možemo vidjeti da se serijski otpor R_s mijenja porastom frekvencije i povećanjem razmak između ploča d . Povećavanjem frekvencije otpor se smanjuje pri svim razmacima

ploča. Najmanji otpor izmjeren je pri najmanjem razmaku ploča d_1 i najvišoj mjernoj frekvenciji od 100 kHz a iznosi 6.454Ω dok je najveća vrijednost otpora zabilježena pri najnižoj frekvenciji od 100 Hz i pri najvećem razmaku ploča d_5 , $3.233 \text{ M}\Omega$. Povećavanjem razmaka između ploča odnosno dodavanjem broja papira otpor se povećava, R_s za d_5 je gotovo 80 puta veći od d_1 na frekvenciji od 100 Hz te se taj omjer povećava porastom frekvencije.

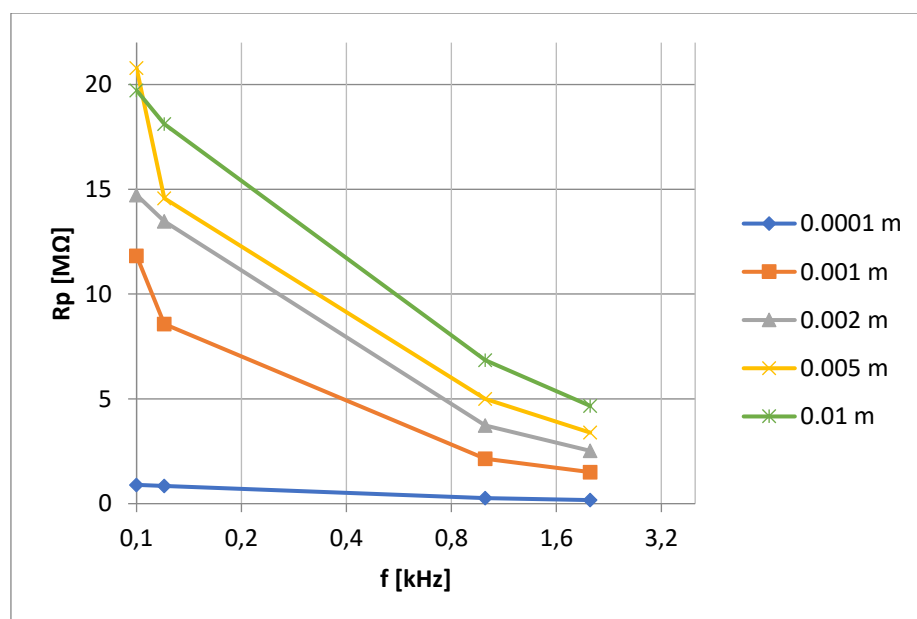
Oba instrumenta pokazuju slične vrijednosti, najveće razlike su bile pri nižim frekvencijama (100 i 120 Hz) relativne pogreške do 49% koja je zabilježena pri d_4 ($1468.7 \text{ k}\Omega$ u odnosu na $987.6 \text{ k}\Omega$). Na frekvenciji od 1 kHz male su relativne pogreške dvaju instrumenata gdje je najveća pogreška bila 6% za razmak između ploča d_5 odnosno 0.01 m ($274.4 \text{ k}\Omega$ naspram $259.4 \text{ k}\Omega$).

Tablica 2. Paralelni otpor R_P pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT 612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Rp [MΩ]					f [kHz]	Rp [MΩ]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	0.9377	7.94	12.944	18.24	24.3	0.1	0.8973	11.831	14.729	20.785	19.723
0.12	0.8391	7.061	11.718	16.496	21.9	0.12	0.8521	8.577	13.472	14.569	18.113
1	0.2525	2.204	3.729	5.03	6.75	1	0.2599	2.147	3.727	4.996	6.843
10	0.06303	0.5278	0.943	1.286	1.8904	2	0.17038	1.506	2.521	3.392	4.667
100	0.011346	0.09843	0.16545	0.25	0.365						



Slika 22. Paralelni otpor R_P pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



Slika 23. Paralelni otpor R_P pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

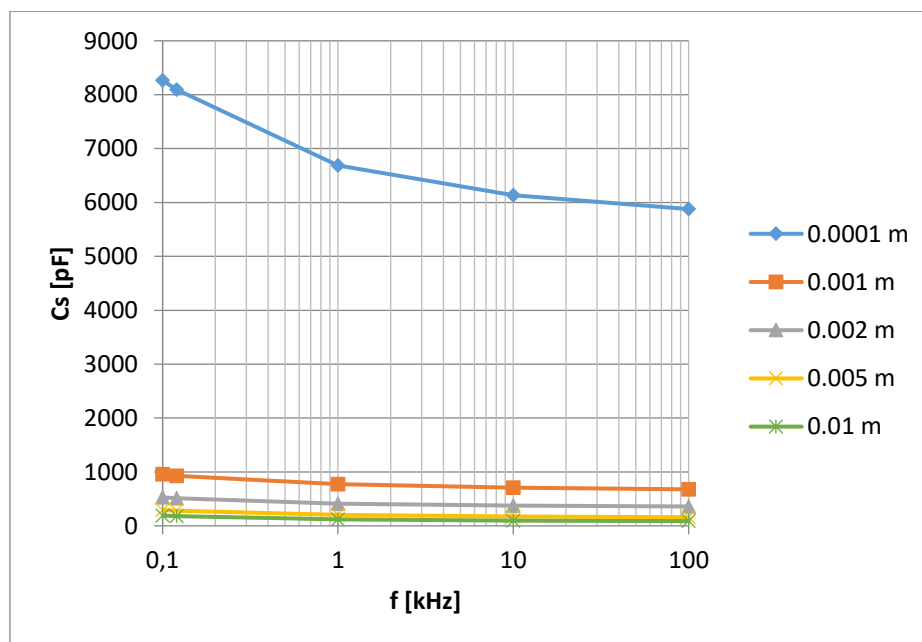
Iz priloženih tablica i grafova možemo vidjeti da se paralelni otpor R_P , kao i serijski otpor R_S , mijenja povećavanjem frekvencije i razmaka između ploča. Početne vrijednosti su višestruko veće nego kod serijskog otpora ali su promjene manje izraženije odnosno sporije opadaju zbog većeg otpora.

Najmanje vrijednost paralelnog otpora R_P zabilježena je kod najmanjeg razmaka ploče d_1 na 100 kHz, 11 346 Ω , dok je najveća vrijednost pri najmanjem razmaku ploča d_5 te iznosi 24.3 M Ω .

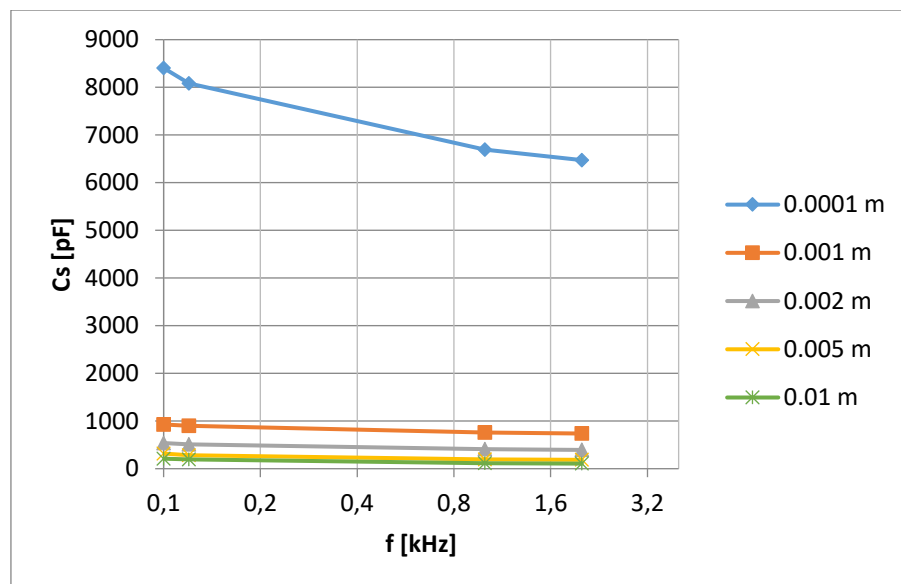
I kod paralelnog otpora R_P su najveće relativne pogreške dvaju instrumenata bile pri nižim frekvencijama i manjim razmacima ploča. Maksimalna relativna pogreška bila 33% za d_2 pri 100 Hz gdje je zabilježeno 7.94 M Ω u odnosu na 11.831 M Ω koliko je izmjerio GW Instek LCR-816. Porastom frekvencije smanjuju se razlike između mjerenih rezultata što je uočljivo na slici 23 gdje na frekvenciji od 100 kHz rezultati teže prema istoj točki.

Tablica 3. Serijski kapacitet C_s pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT 612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Cs [pF]					f [kHz]	Cs [pF]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	8264	956	528	294	192	0.1	8405.1	927.96	538.3	317.91	210.73
0.12	8093	931	513	282	182	0.12	8082.8	899.49	510.97	284.55	194.56
1	6688	771.5	413.1	201.7	119.3	1	6692.2	761.86	408.61	198.43	115.75
10	6133	708.2	376.4	172.35	97.09	2	6473.5	738.01	393.88	186.41	106.93
100	5878	677.5	360.2	160.25	88.38						



Slika 24. Serijski kapacitet C_s pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



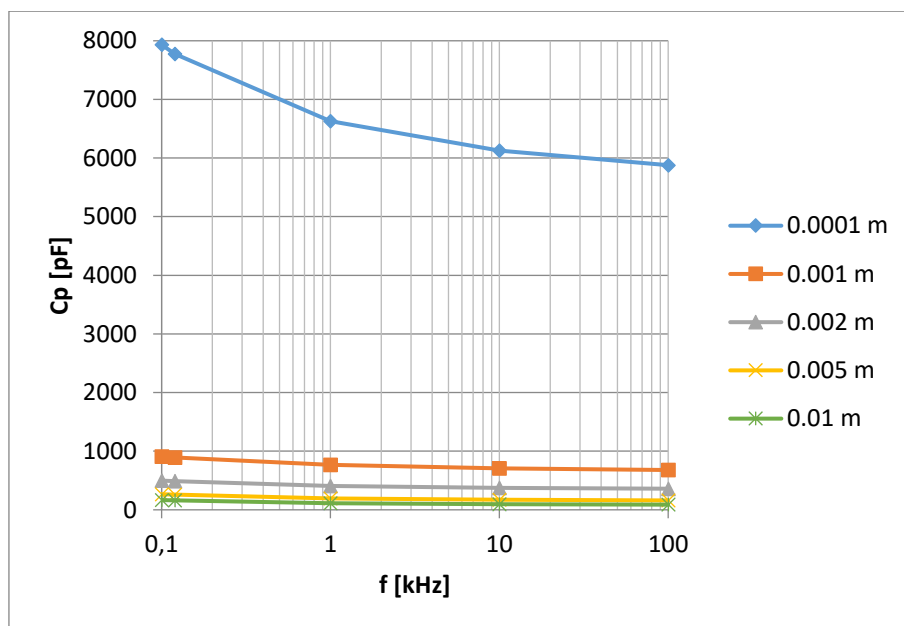
Slika 25. Serijski kapacitet C_s pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Povećavanjem razmaka između ploča kapacitet se smanjuje tako da su najveći kapaciteti zabilježeni kod razmaka ploče d_1 dok su najmanji, očekivano, bili pri d_5 . Najveća vrijednost serijskog kapaciteta C_s zabilježena je pri razmaku ploče d_1 te najnižoj mjernoj frekvenciji od 100 Hz te iznosi 8264 pF izmjereno UT612 uređajem odnosno 8405.1 pF izmjereno GW Instek LCR-816. Najmanje vrijednost serijskog otpora C_s izmjerena je pri razmaku ploča d_5 i najvišoj mjernoj frekvenciji od 100 kHz a iznosi 88.38 pF. Kod razmaka ploče d_5 na 100 kHz kapacitet C_s je 117% manji od kapaciteta na 100 Hz dok je pri d_1 razlika samo 40% u odnosu na maksimalnu (razmak ploča d_1) i minimalnu vrijednost (razmak ploča d_5).

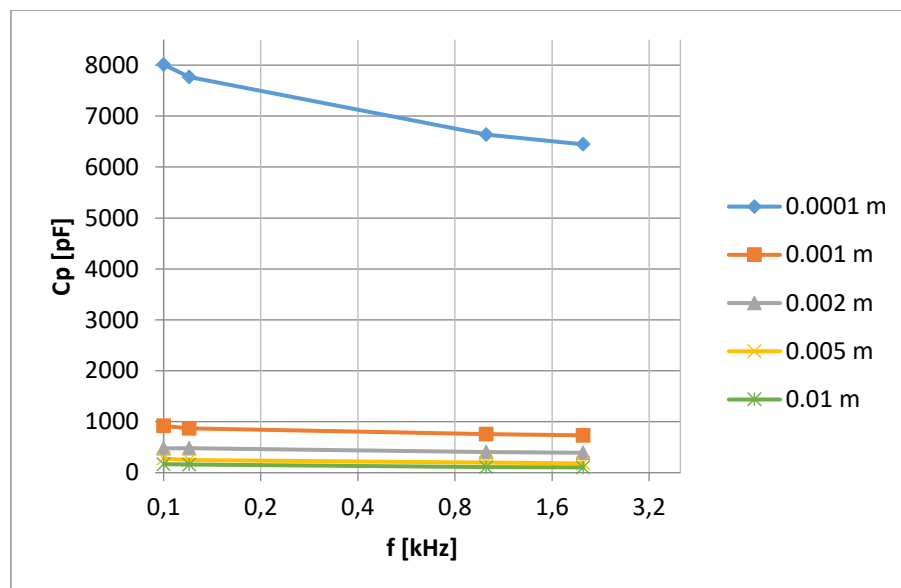
I ovdje su relativne pogreška između dvaju instrumenata izraženija pri većim razmacima ploča te opadaju porastom frekvencije. Maksimalna razlika između rezultata zabilježena je na najnižoj frekvenciji pri d_5 i iznosi 9% (192 pF izmjereno UT-612 u odnosu na 210.73 pF izmjereno GW Instekom LCR-816).

Tablica 4. Paralelni kapacitet C_p pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Cp [pF]					f [kHz]	Cp [pF]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	7932	911	498	266	166	0.1	8012	917.8	478.79	277.69	167.51
0.12	7776	894	487	257	160	0.12	7769.3	872.71	478.7	247.25	160.24
1	6631	764.6	408.8	196.8	114.5	1	6638.7	755.54	404.16	198.43	111.35
10	6125	707.2	375.8	171.48	96.38	2	6445.4	733.52	391.05	183.64	104.36
100	5878	678.8	360.1	160.07	88.2						



Slika 26. Paralelni kapacitet C_p pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



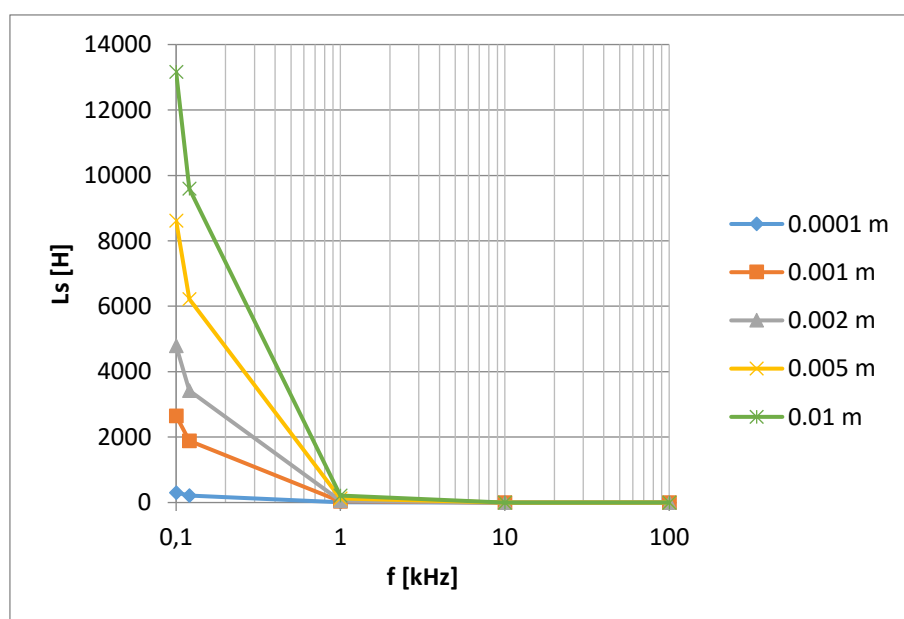
Slika 27. Paralelni kapacitet C_P pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Paralelni kapacitet C_P ima slične karakteristike i rezultate kao i serijski kapacitet ali sa nešto manjim vrijednostima. I ovdje se vidi eksponencijalni pad kapaciteta porastom frekvencijom te smanjivanje kapaciteta povećavanjem razmaka između ploča. Promjene su izraženije pri većim razmacima i pri nižim frekvencijama. Najveća vrijednost je zabilježena pri najmanjem razmaku ploča d_1 pri najmanjoj frekvenciji od 100 Hz, 8012 pF izmjereno GW Instek LCR-816, dok je najmanja vrijednost izmjerena UT-612 uređajem pri 100 kHz te iznosi 88.2 pF.

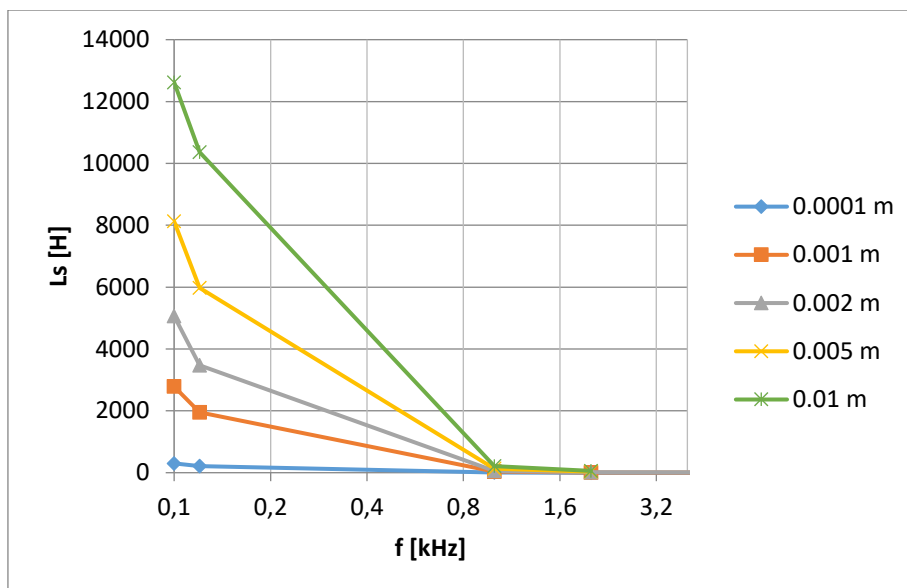
Kod mjerenja paralelnog kapaciteta izražene su vrlo male razlike dvaju instrumenata tako da je maksimalna razlika bila 4%, razmak d_4 pri 100 Hz i 120 Hz (266 pF u odnosu na 277.69 pF te 257 pF u odnosu na 247.25 pF)

Tablica 5. Serijski induktivitet L_s pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW instek LCR-816					
f [kHz]	Ls [H]					f [kHz]	Ls [H]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	305.8	2651	4791	8614	13160	0.1	300.92	2784.3	5064.3	8122.9	12621
0.12	217	1887.4	3423	6224	9599	0.12	217.56	1948.7	3469.5	5972.4	10359
1	3.788	32.84	61.31	125.2	212.2	1	3.7838	33.183	61.976	127.71	218.29
10	0.04129	0.3576	0.6731	1.469	2.609	2	0.97847	8.476	16.08	33.828	59.177
100	0.000431	0.00374	0.00703	0.01581	0.02868						



Slika 28. Serijski induktivitet L_s pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



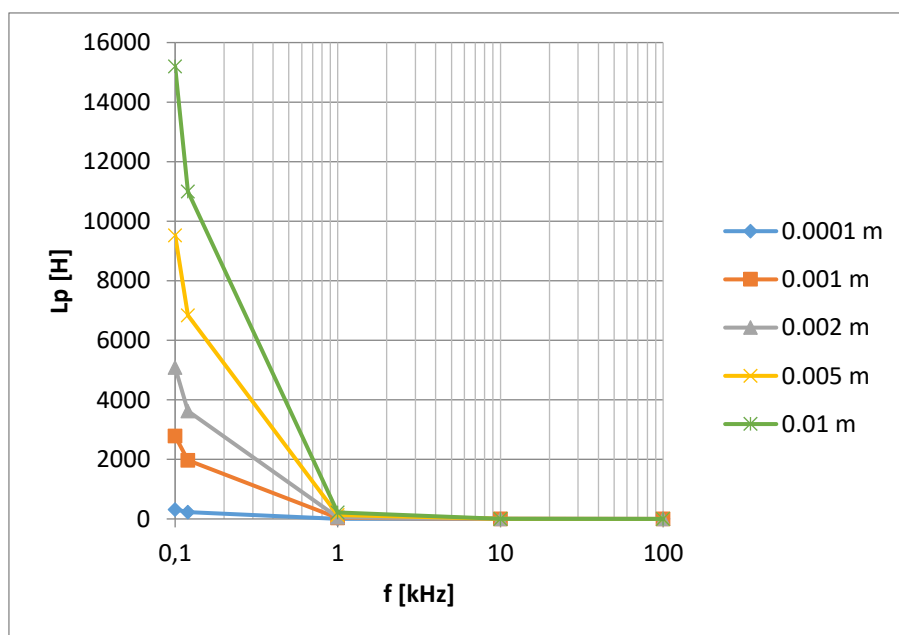
Slika 29. Serijski induktivitet L_S pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Karakteristike serijskog induktiviteta L_S imaju slične karakteristike kao i serijski otpor ali su promjene brže nego kod otpora. Nakon početnih vrijednosti već na 1 kHz vrijednosti su 80 puta manje u odnosu na prethodnu frekvencijsku mjernu točku te se razlike povećavaju promjenom odnosno porastom frekvencijom. Na višim frekvencijama vrijednosti su gotovo 100 puta manje od prethodne mjerne točke, npr: pri razmaku ploča d_1 L_S na 10 kHz iznosi 41.29 mH dok na 100 kHz iznosi 431 μ H. Najmanje vrijednosti zabilježene su na najvišoj ispitnoj frekvenciji, za d_1 vrijednost serijskog induktiviteta je 431 μ H dok je za d_5 na 100 kHz induktivitet iznosio 28.68 mH. Najveće vrijednosti su na najnižoj frekvenciji od 100 Hz, od 305.8 H za d_1 do 13160 H za razmak ploča d_5 .

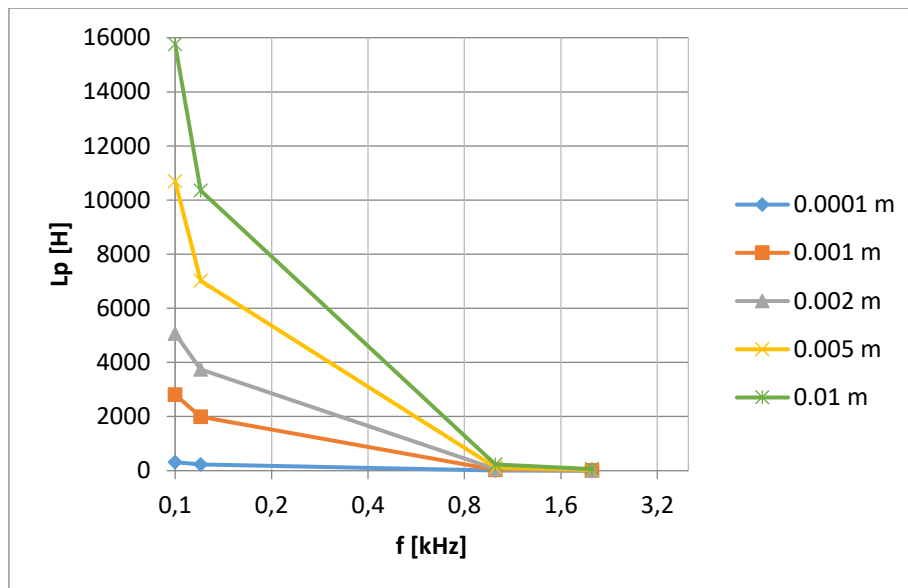
Instrumenti pokazuju slične vrijednosti pogotovo na većim frekvencijama gdje je maksimalna razlika 3% pri razmaku d_5 na frekvenciji od 1 kHz iznosi L_S su 212.2 H u odnosu na 218.29 H. Nešto veće razlike su na nižim frekvencijama te iznosi oko 7%, također pri razmaku ploča d_5 na frekvenciji od 120 Hz gdje su izmjerene vrijednosti 10359 H u odnosu na 9599 H.

Tablica 6. Paralelni induktivitet L_P pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Lp [H]					f [kHz]	Lp [H]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	320.3	2782	5089	9530	15197	0.1	315.64	2807.6	5069	10700	15751
0.12	226.1	1967.6	3620	6837	10996	0.12	226.364	1994.6	3747.2	7019.8	10351
1	3.824	33.15	62.01	128.85	221.3	1	3.8158	33.551	62.698	131.1	228.23
10	0.04139	0.3584	0.6748	1.478	2.629	2	0.98252	8.6232	16.212	34.553	60.898
100	0.000431	0.00374	0.00704	0.01584	0.02876						



Slika 30. Paralelni induktivitet L_P pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



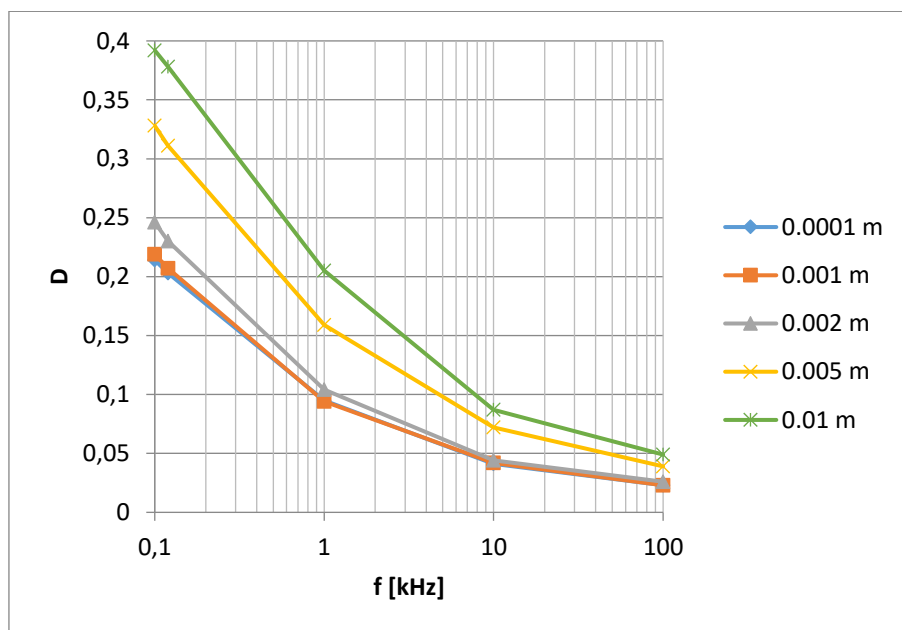
Slika 31. Paralelni induktivitet L_P pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Karakteristike paralelnog induktiviteta L_P za oba instrumenta vrlo su slične serijskom induktivitetu uz nešto više vrijednosti, pogotovo na nižim frekvencijama. Na višim frekvencijama razlike se smanjuju te imamo gotovo iste vrijednosti, npr: pri d_1 razmaku ploča i frekvenciji od 1 kHz L_P iznosi 3.824 H odnosno 3.8158 H. Kao i kod serijskog induktiviteta najmanje vrijednost paralelnog induktiviteta zabilježena je pri najmanjem razmaku ploča d_1 i najviše mjerne frekvencije od 100 kHz iznosa 431 μH dok je najveća vrijednost od 15197 H zabilježena kod najvećeg razmaka ploče d_5 na najnižoj frekvenciji od 100 Hz.

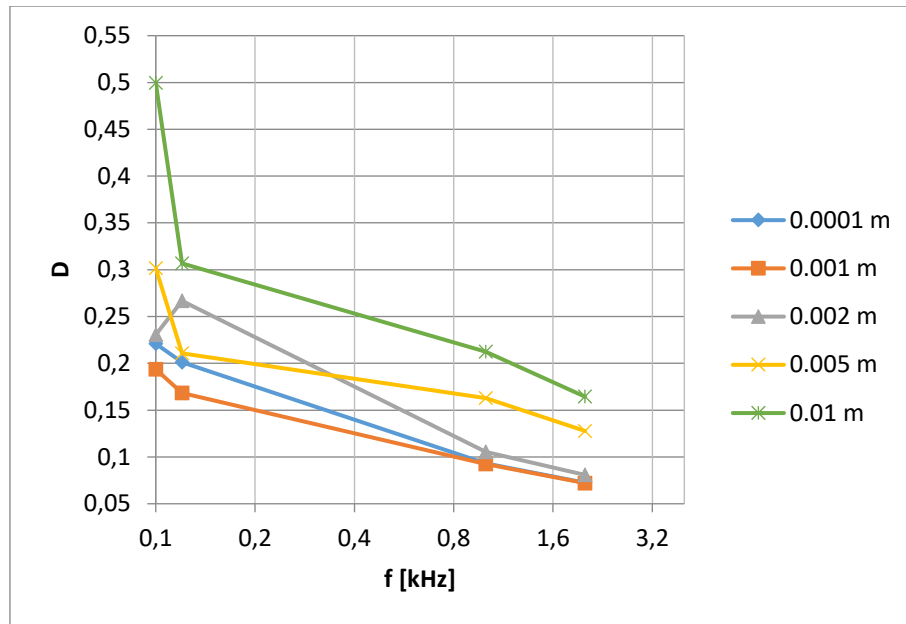
Razlike između izmjerenih vrijednosti dvaju instrumenata najmanje su pri manjim razmacima ploče i višim ispitnim frekvencijama. Maksimalna razlika izmjerenih vrijednosti iznosi 11% i to pri razmaku ploča od 0.005 m na frekvenciji od 100 Hz gdje su izmjerene vrijednosti 10700 H u odnosu na 9530 H izmjereno UT612 uređajem.

Tablica 7. Faktor disipacije D pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	D					f [kHz]	D				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	0.214	0.219	0.246	0.328	0.392	0.1	0.221	0.1937	0.2307	0.3016	0.4995
0.12	0.203	0.207	0.23	0.311	0.378	0.12	0.201	0.1685	0.2667	0.2106	0.3066
1	0.095	0.094	0.104	0.159	0.205	1	0.093	0.0926	0.1053	0.163	0.2124
10	0.041	0.042	0.044	0.072	0.087	2	0.0725	0.0721	0.0808	0.1278	0.1644
100	0.023	0.023	0.026	0.039	0.049						



Slika 32. Faktor disipacije D pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



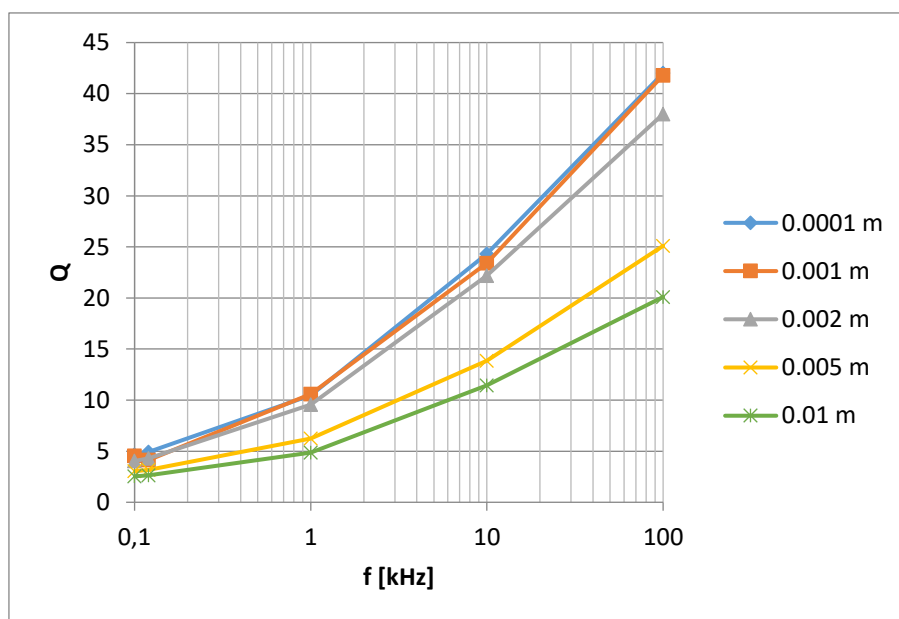
Slika 33. Faktor disipacije D pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Iz tablica i grafova može se primijetiti pad izmjerenih vrijednosti faktora disipacije D porastom frekvencije, pri razmaku ploča d_2 i frekvenciji od 100 Hz izmjereno je 0.219 odnosno 0.1937 dok je za mjernu frekvenciju od 100 kHz faktor disipacije iznosio 0.023. Kako se povećava razmak ploča odnosno smanjuje kapacitet pločastog kondenzatora povećava se i faktor disipacije. Za razmak ploče d_1 pri frekvenciji od 100 Hz faktor disipacije iznosi 0.214 izmjeren UT612 uređajem dok za razmak ploča d_5 iznosi gotovo dvostruko odnosno 0.392. Znači, najveće faktore disipacija kondenzator ima pri većem razmaku ploča i nižoj frekvenciji dok su najmanji pri manjem razmaku ploča i višim frekvencijama (d_1 i d_2 na frekvenciji 100 kHz iznose 0.023).

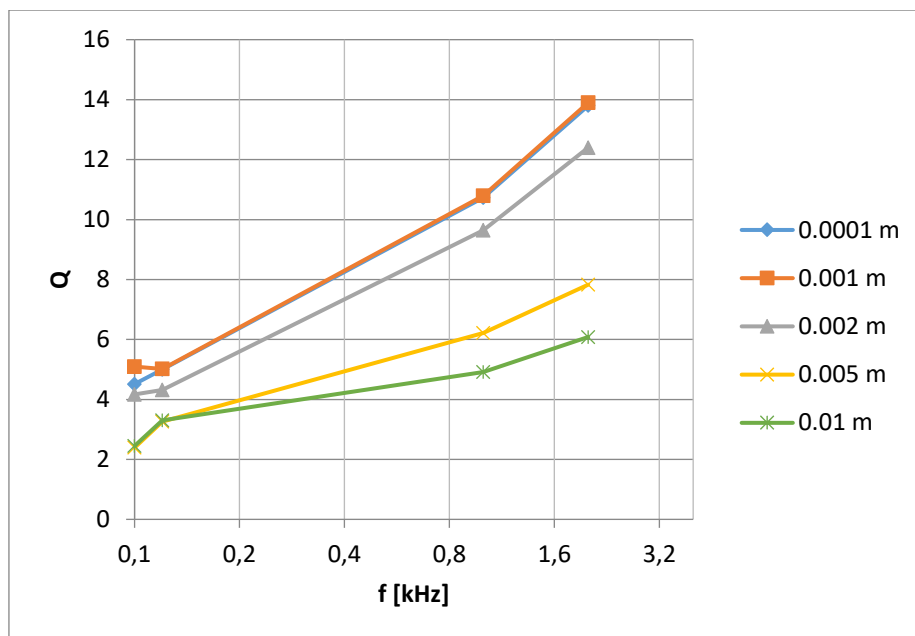
Kod mjerenja faktora disipacije mjerni uređaji su pokazivali nešto veće razlike koje su bile naglašenije pri nižim frekvencijama. Maksimalna razlika izmjerenih rezultata iznosila je 48%, pri razmaku ploča d_4 na 120 Hz gdje su izmjereni faktori disipacije od 0.311 i 0.2106, dok su se u nekim slučajevima rezultati razlikovali samo 1%, za d_3 pri frekvenciji 1 kHz faktori disipacije su izmjereni 0.104 i 0.1053.

Tablica 8. Faktor dobrote Q pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Q					f [kHz]	Q				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	4.65	4.54	4.04	3.04	2.54	0.1	4.513	5.096	4.168	2.391	2.45
0.12	4.91	4.13	4.31	3.18	2.63	0.12	4.995	5.016	4.318	3.259	3.299
1	10.47	10.58	9.57	6.23	4.85	1	10.73	10.79	9.647	6.214	4.911
10	24.3	23.4	22.2	13.84	11.43	2	13.8	13.9	12.4	7.829	6.083
100	42	41.8	38	25.1	20.1						



Slika 34. Faktor dobrote Q pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



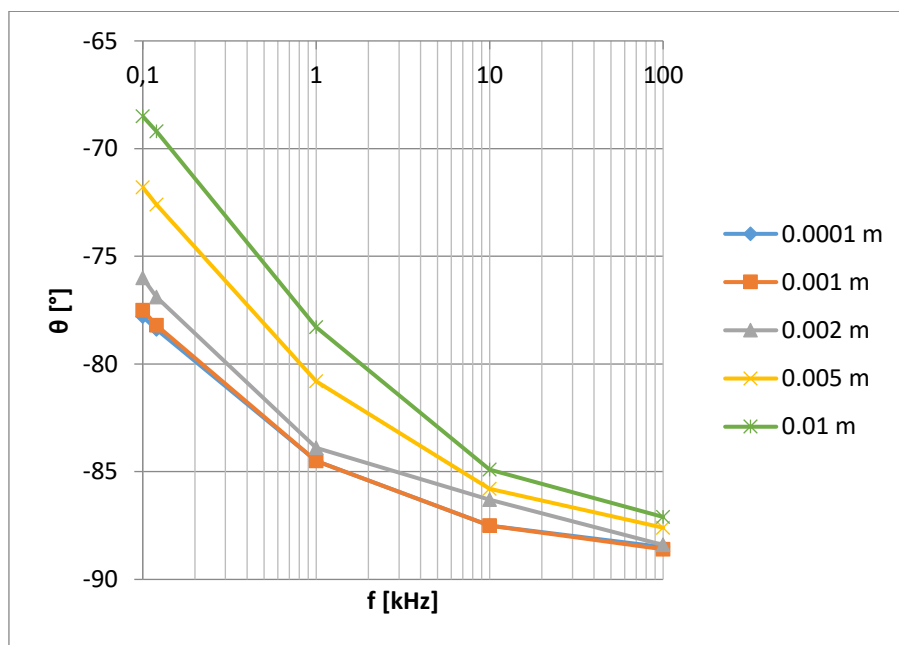
Slika 35. Faktor dobrote Q pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Faktor dobrote se povećava porastom frekvencije što se može vidjeti iz priloženih grafova i tablica. Najveća vrijednost faktora dobrote zabilježena je pri najmanjem razmaku ploča d_1 i najvećoj frekvenciji 100 kHz te iznosi 42. Najmanja vrijednost je pri najvećem razmaku ploča d_5 i frekvenciji od 100 Hz a iznosi 2.54. Iz tablice se vidi da faktor dobrote pri istoj frekvenciji opada povećavanjem razmaka između ploča, za d_1 faktor dobrote iznosi 42 pri 100 kHz dok za istu frekvenciju za d_5 iznosi 20.1 izmjereno UT612 uređajem.

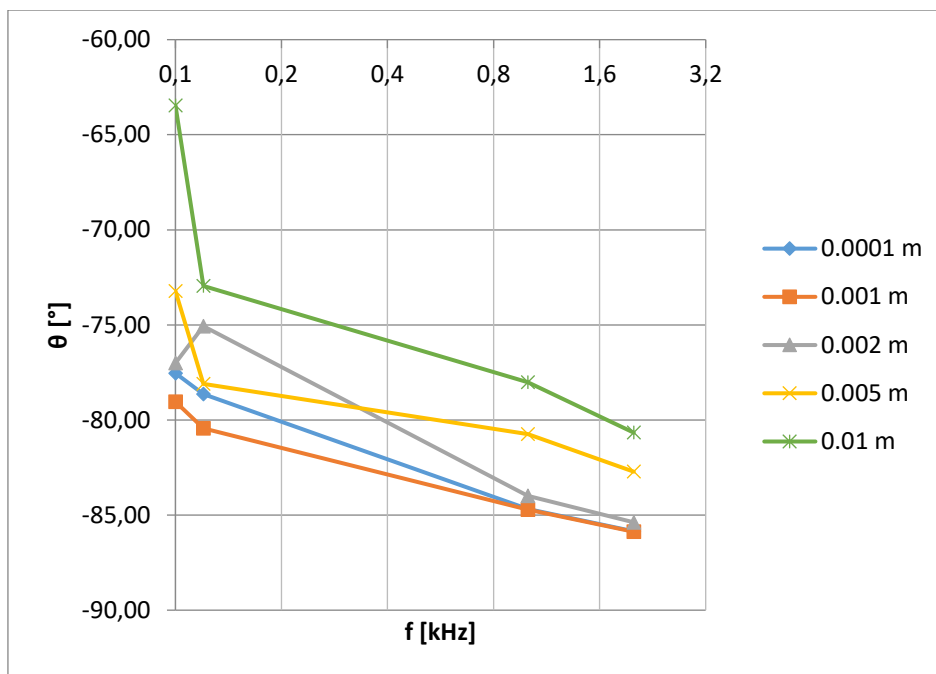
Najveća razlika izmjerenih rezultat dvaju uređaja iznosila je 27% na mjernoj frekvenciji od 100 Hz pri razmaku ploča d_4 gdje su faktori dobrote Q iznosili 3.04 izmjereno UT612 uređajem odnosno 2.391 izmjereno GW Instek LCR-816 uređajem.

Tablica 9. Kut faznog pomaka θ pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	θ					f [kHz]	θ				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	-77.8	-77.5	-76	-71.8	-68.5	0.1	-77.54	-79.04	-77.01	-73.22	-63.46
0.12	-78.4	-78.2	-76.9	-72.6	-69.2	0.12	-78.63	-80.44	-75.07	-78.11	-72.95
1	-84.5	-84.5	-83.9	-80.8	-78.3	1	-84.69	-84.71	-83.99	-80.74	-78.01
10	-87.5	-87.5	-86.3	-85.8	-84.9	2	-85.85	-85.88	-85.38	-82.72	-80.66
100	-88.5	-88.6	-88.4	-87.6	-87.1						



Slika 36. Kut faznog pomaka θ pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



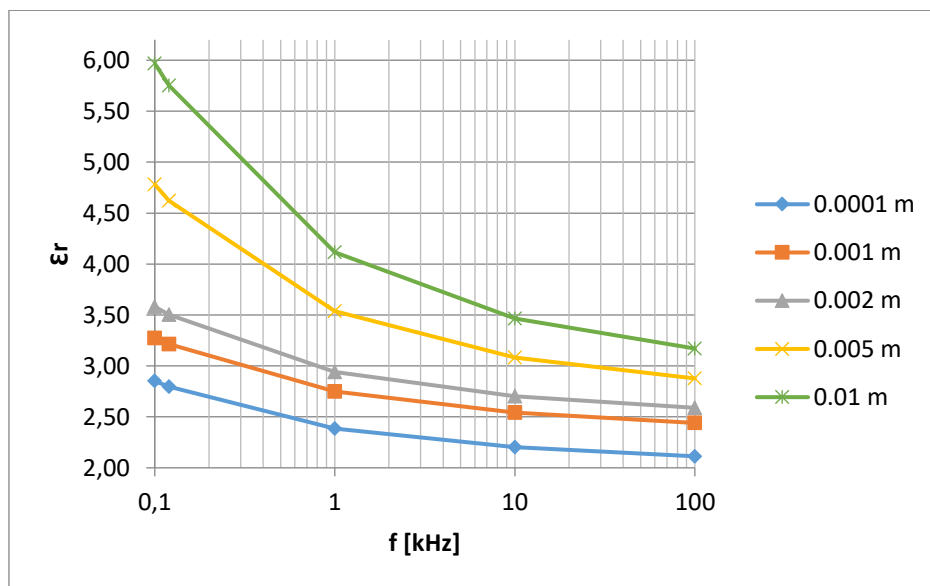
Slika 37. Kut faznog pomaka θ pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Prema tablici 9 i priloženih grafovima vidi se približavanje idealnom faznom kutu pomaka θ od -90° kako se povećava frekvencija na svim razmacima ploča. Najmanji kut zabilježen je kod najvećeg razmaka ploča d_5 na frekvenciji od 100 Hz ($\theta = -68.5^\circ$) dok je najveći kut na najvišoj frekvenciji od 100 kHz i razmaku ploča od 0.001 m ($\theta = -88.6^\circ$). Na višim frekvencijama smanjuje se otpor pa se tako smanjuju i gubici u kondenzatoru što rezultira poboljšanjem faznog kuta pomaka.

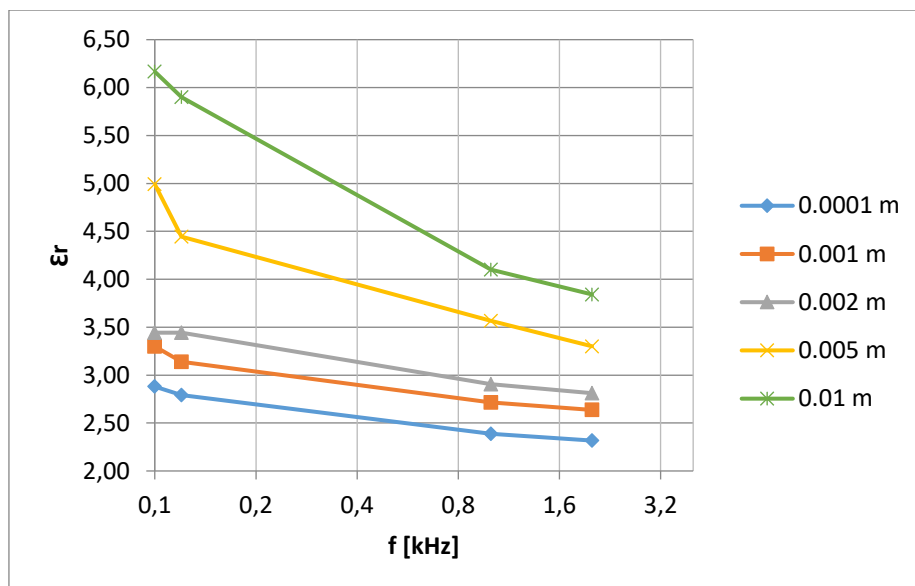
GW Instek LCR-816 uređaj nema mogućnost mjerenja kuta faznog pomaka θ pa su rezultati iz grafa dobiveni preko formule $\tan \delta = D = \tan(90 - \theta)^\circ$ prema izmjerenim podacima za faktor disipacije D . Usporedbom sa izmjerenim rezultatima uređajem UT612 najveća razlika rezultata iznosi 8%, kut faznog pomaka θ za d_5 pri 100 Hz iznosi -68.5° dok je za istu frekvenciju i razmak izračunat kut faznog pomaka od -63.46° .

Tablica 10. Izračunata relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	ϵ_r					f [kHz]	ϵ_r				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	2.85	3.28	3.58	4.78	5.97	0.1	2.88	3.30	3.44	4.99	6.17
0.12	2.80	3.21	3.50	4.62	5.75	0.12	2.79	3.14	3.44	4.44	5.90
1	2.38	2.75	2.94	3.54	4.12	1	2.39	2.72	2.91	3.57	4.10
10	2.20	2.54	2.70	3.08	3.46	2	2.32	2.64	2.81	3.30	3.84
100	2.11	2.44	2.59	2.88	3.17						



Slika 38. Relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



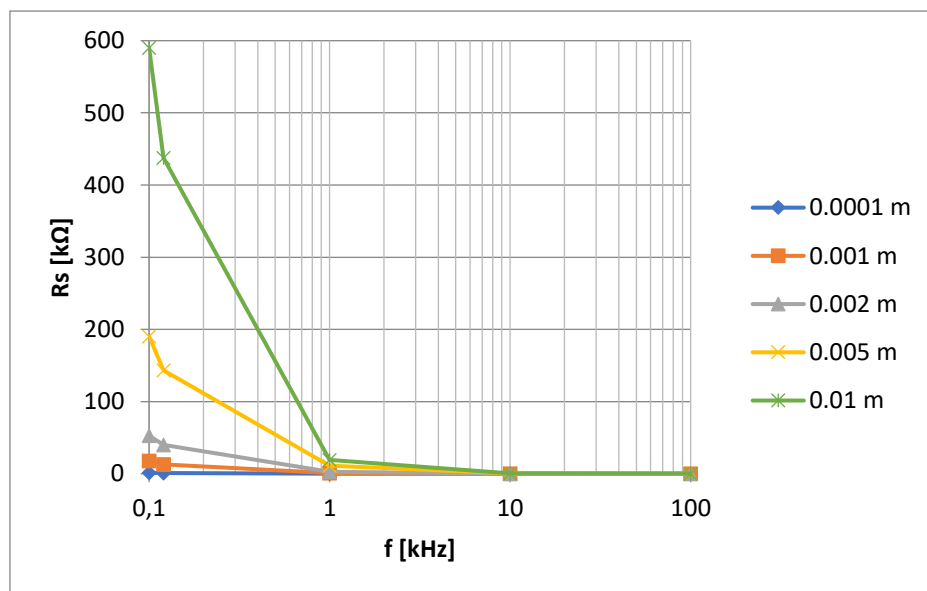
Slika 39. Relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa papirom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Relativna dielektrična konstanta ϵ_r određena je prema izrazu (4-1) sa pripadnim podacima za paralelni kapacitet C_P i određenim razmacima ploče d . Iz grafova je vidljivo kako se dielektrična konstanta mijenja porastom frekvencija odnosno opada u odnosu na početnu vrijednost pri frekvenciji 100 Hz. Pri nižim frekvencijama polarizacijski mehanizmi mogu pratiti promjenu električnog polja te su u fazi za vektorom električnog polja. Kako se frekvencija povećava dipoli ili prostorni ioni sve teže prate promjenu električnog polja do frekvencije kada prelaze u stanje relaksacije te ne doprinose realnom dijelu dielektrične konstante. Povećavanjem frekvencije smanjuje se realni dio a povećava se imaginarni dio dielektrične konstante [20]. Relativnu dielektričnu konstantu papira teško je definirati jer ovisi nekoliko čimbenika koji utječu na istu. U literaturi se često navodi kako se kreće između 1.5 i 6 što ovisi o vrsti materijala za izradu (na bazi drveta, riže, celulozni) gramaturi papira, načinu izrade, vlažnosti papira i okoline, kompozicije papira, hrapavosti, itd [24]. U mjerenjima je korišten papir za kopiranje bez premaza (neobloženi), gramature 80 g/m², bezdrveni papir bez kemijskih tretmana sa 3.8–5% vlažnosti. U oba slučaja mjerenja odnosno izračunavanja dielektrične konstante, najprikladniji ili relevantniji dobiveni rezultati su pri manjim razmacima ploča te odgovaraju vrijednostima iz literature [24]. Pri najmanjem razmaku ploča od 0.0001 m dielektrična konstanta je 2.85 odnosno 2.88 dok je pri razmaku 0.002 m dielektrična konstanta 3.58 odnosno 3.44. Najveća razlika rezultata izračunatih vrijednosti relativne dielektrične konstante zabilježeni su pri razmaku

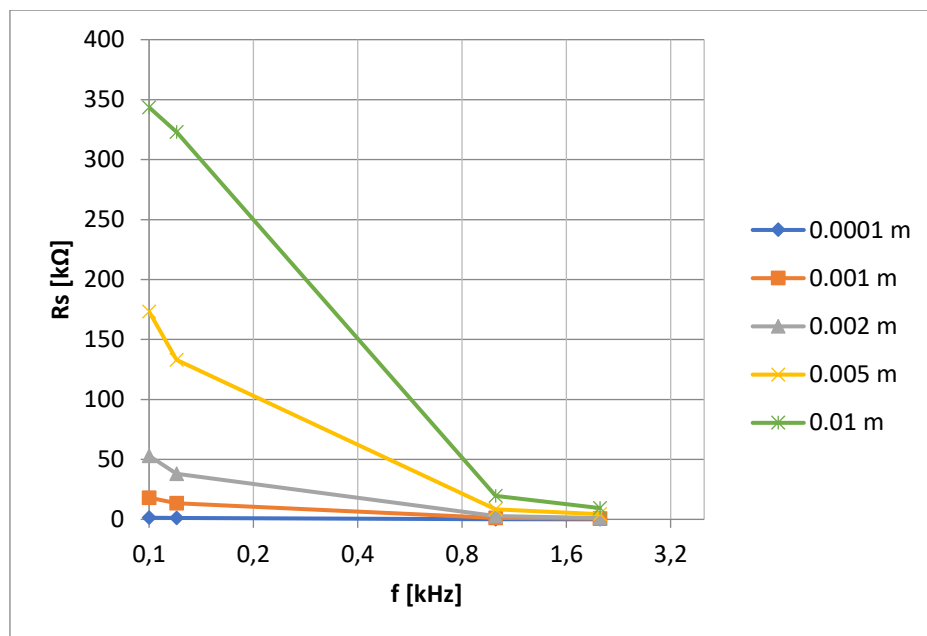
ploča od 0.005 m pri 100 i 120 Hz te iznosi 4% (4.78 i 4.99 za 100 Hz odnosno 4.62 i 4.44 za 120 Hz). Kako se frekvencija povećava smanjuju se razlike između rezultata što je vidljivo iz grafova za oba slučaja.

Tablica 11. Serijski otpor R_s pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT 612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	R_s [k Ω]					f [kHz]	R_s [k Ω]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	1.53	17.895	52.83	190.44	590	0.1	1.391	18.12	53.05	173.2	343.6
0.12	1.025	12.883	40.2	143.32	437.8	0.12	1.113	13.37	38.13	133	323
1	0.1233	1.19	2.575	11.246	19.19	1	0.1324	1.258	2.849	8.454	19.64
10	0.013594	0.15004	0.299	0.348	0.66	2	0.0761	0.6927	1.149	4.322	9.422
100	0.00304	0.027	0.05204	0.1314	0.2316						



Slika 40. Serijski otpor R_s pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



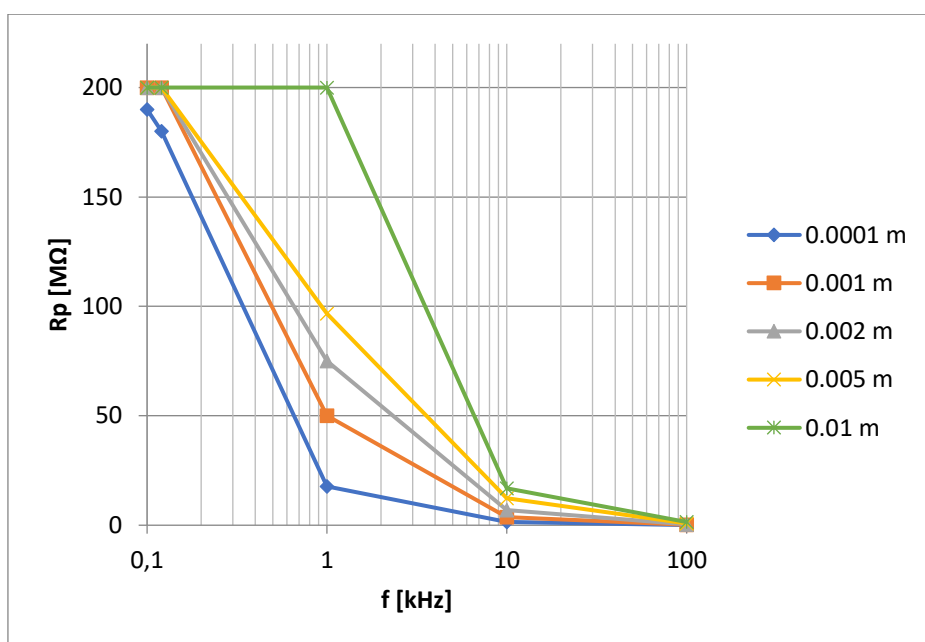
Slika 41. Serijski otpor R_s pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Pločasti kondenzator sa folijom od termoplastičnog polimera ima slične karakteristike kao i pločasti kondenzator sa papirom ali sa nešto umanjenim vrijednostima, što je vidljivo iz tablica i grafova. Prema priloženim grafovima na slikama 40 i 41 može se vidjeti pad otpora R_s porastom frekvencije. Najveća vrijednost zabilježena je pri najnižoj mjernoj frekvenciji od 100 Hz te najvećem razmaku ploča d_5 , $R_s = 590 \text{ k}\Omega$ izmjereno UT612 mjernim uređajem. Najmanja vrijednost izmjerena je na najmanjem razmaku ploča d_1 i najvišoj frekvencijskoj mjernoj točki od 100 kHz te iznosi $3.04 \text{ }\Omega$. Nagle i veće promjene vrijednosti R_s zabilježene su na nižim frekvencijama dok na frekvencijama od 10 kHz pa naviše promjene su manje i sporije. Može se također vidjeti da se otpor povećava dodavanjem listova folije tako da npr: za mjernu frekvenciju od 1kHz pri d_1 $R_s = 123.3 \text{ }\Omega$, pri d_3 $R_s = 2.575 \text{ k}\Omega$ dok je za najveći razmak ploča d_5 $R_s = 18.001 \text{ k}\Omega$ izmjereno UT612 mjernim uređajem.

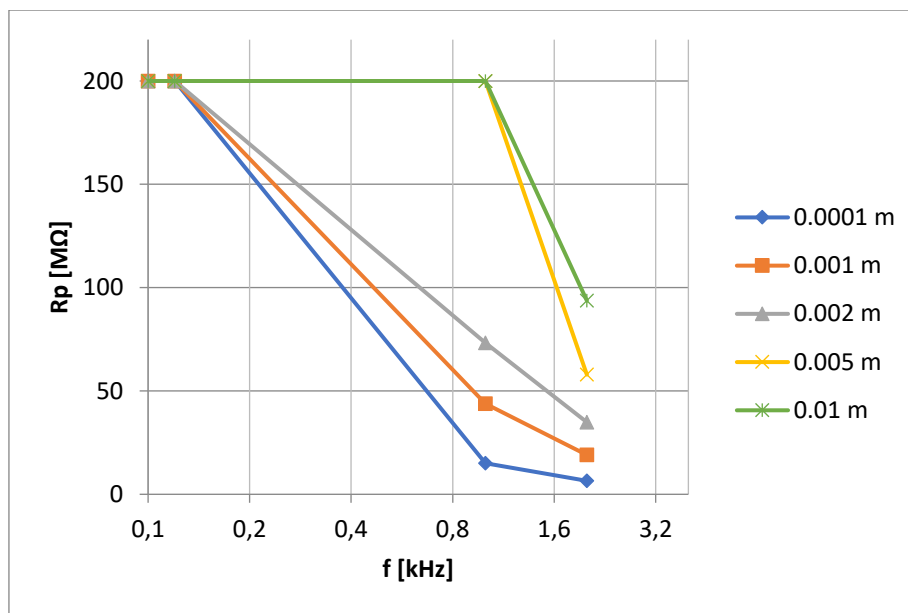
Instrumenti su na većini mjernih točaka pokazivali slične vrijednosti sa malom pogreškom dok su u nekim slučajevima razlike izraženije kao npr: pri frekvenciji od 100 Hz i razmaku ploča d_5 serijski otpor R_s su iznosili $590 \text{ k}\Omega$ izmjereno UT612 mjernim uređajem dok je GW Instek LCR-816 izmjerio $343.6 \text{ k}\Omega$ što čini razliku od 72%.

Tablica 12. Paralelni otpor R_p pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT 612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Rp [MΩ]					f [kHz]	Rp [MΩ]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	141.5	200	200	200	200	0.1	200	200	200	200	200
0.12	135.2	200	200	200	200	0.12	200	200	200	200	200
1	18.001	50	75.1	96.7	200	1	14.963	43.889	73.217	200	200
10	1.412	3.71	6.94	12.3	16.93	2	6.516	19.052	34.898	57.923	93.721
100	0.06683	0.205	0.401	0.81	1.457						



Slika 42. Paralelni otpor R_p pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem

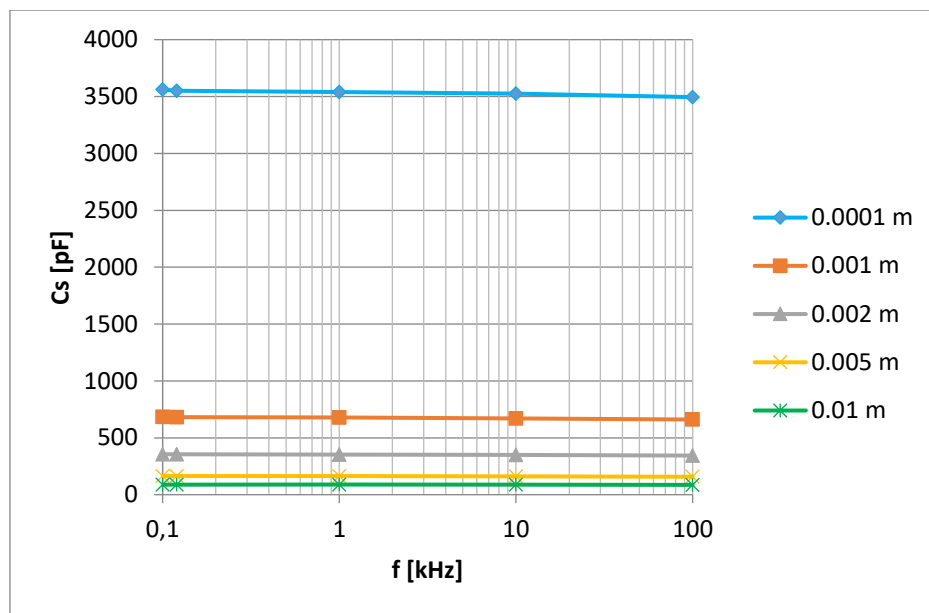


Slika 43. Paralelni otpor R_p pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

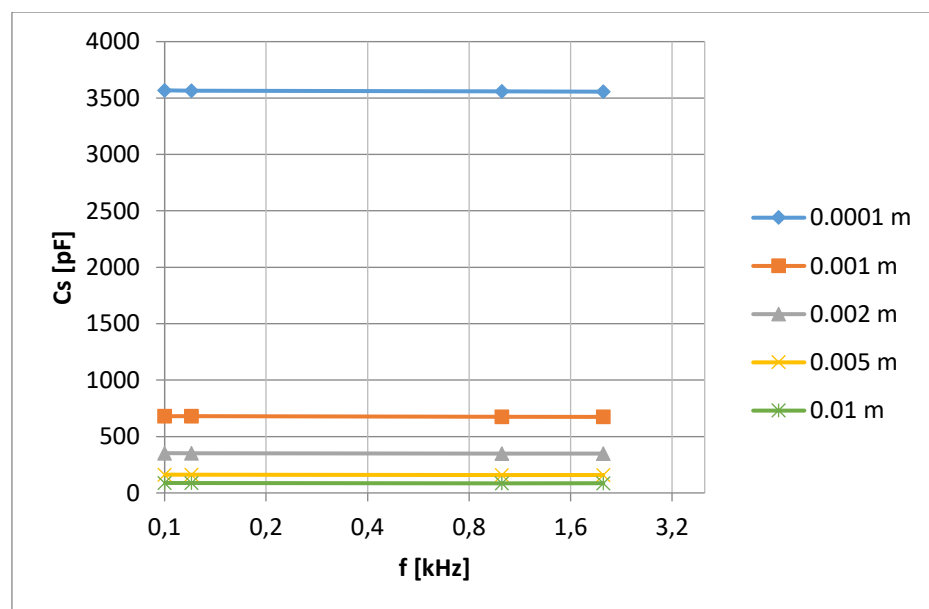
Paralelni otpor R_p također opada porastom frekvencije iako je velik i pri najvišim mjernim frekvencijama. Na nižim frekvencijama paralelni otpor iznosi više od 200 MΩ odnosno više nego što mjerni uređaji mogu izmjeriti. Pri najvećem razmaku d_5 tek na frekvenciji od 10 kHz dobije se relevantni rezultat $R_p = 16.93 \text{ M}\Omega$ koji na frekvenciji od 100 kHz padne na 1.457 MΩ. Najmanja izmjerena vrijednost zabilježena je na frekvenciji od 100 kHz i razmaku ploča d_1 te iznosi $R_p = 66.83 \text{ k}\Omega$. Kao i kod serijskog otpora uočene su veće pogreške između dva mjerna uređaja te je najveća pogreška zabilježena na frekvenciji od 1 kHz i razmaku ploča d_4 .

Tablica 13. Serijski kapacitet C_s pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT 612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Cs [pF]					f [kHz]	Cs [pF]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	3561	685	356	165	87	0.1	3568.2	680.15	352.69	162.07	88.421
0.12	3552	681	355	164	87	0.12	3564.4	679.58	352.64	161.67	88.029
1	3539	677.7	352.3	162.8	89.3	1	3559.6	675.69	349.71	159.38	86.302
10	3525	671.1	349.2	160.73	87.9	2	3556.5	674.02	348.98	158.92	86.166
100	3495	660.8	344	157.89	86.31						



Slika 44. Serijski kapacitet C_s pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



Slika 45. Serijski kapacitet C_s pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

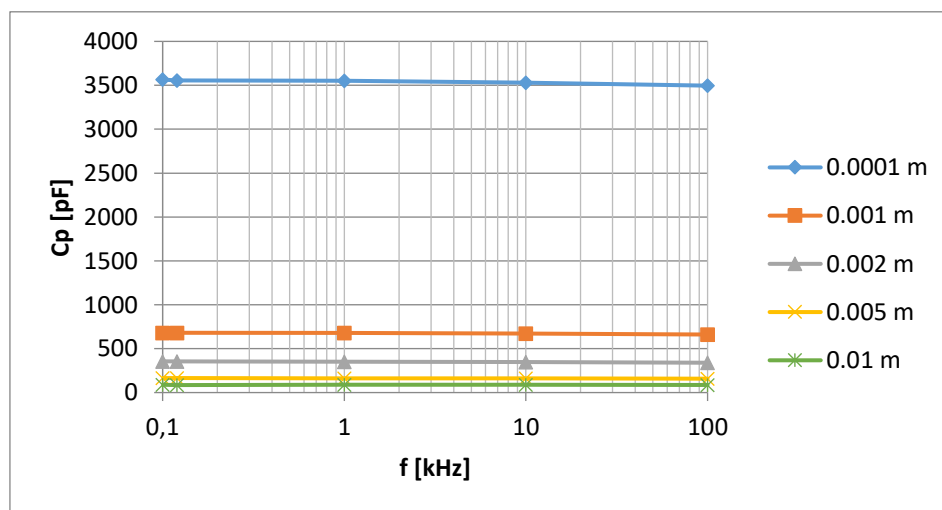
Povećavanjem razmaka ploča dolazi do promjene odnosno do smanjenja kapaciteta kondenzatora ali ne u tolikoj mjeri kao kod kondenzatora sa papirom za dielektrik. I ovdje je najveći kapacitet izmjeren pri najmanjem razmaku ploča d_1 pri frekvenciji od 100 Hz, $C_s = 3561$ pF izmjeren UT 612 mjernim

uređajem odnosno 3568.2 pF izmjereno GW Instek LCR-816 mjernim uređajem. Najmanja vrijednost izmjerena je pri najvećem razmaku ploča d_2 te najvišoj frekvenciji od 100 kHz, $C_s = 86.31$ pF. Može se primijetiti iz priloženih grafova ali i tablica, da je krivulja serijskog kapaciteta C_s gotovo ravna odnosno da nema većih promjena na različitim mjernim frekvencijama. Ukoliko pogledamo razmak ploča d_1 , na najnižoj frekvenciji C_s iznosi 3559 pF dok je na najvišoj frekvenciji izmjereno 3495 pF što je razlika oko 2%. Za razmak ploča d_3 razlika mjernih rezultata na najvišoj i najnižoj frekvenciji je nešto više te iznosi oko 3.5 % dok je za razmak ploča d_5 ta razlika manja od 1%.

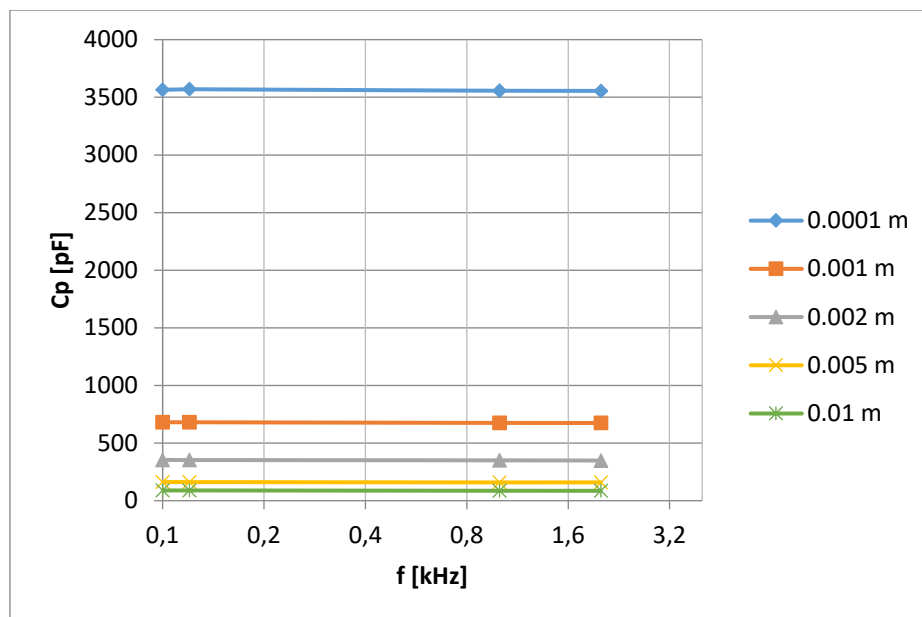
Mjerni uređaji su prikazivalo gotovo iste rezultate, najveća zabilježena razlika je pri razmaku ploča d_5 i frekvenciji od 1 kHz gdje je UT612 izmjerio $C_s = 89.3$ pF a GW Instek LCR-816 izmjerio 86.302 pF što čini razliku od 3%.

Tablica 14. Paralelni kapacitet C_P pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Cp [pF]					f [kHz]	Cp [pF]				
	d1 0.0001 m	d2 0.001 m	d3 0.002 m	d4 0.005 m	d5 0.01 m		d1 0.0001 m	d2 0.001 m	d3 0.002 m	d4 0.005 m	d5 0.01 m
0.1	3565	681	356	165	88	0.1	3564.5	680.62	353.52	161.78	89.156
0.12	3554	681	355	164	87	0.12	3570	679.53	352.55	161.72	88.642
1	3550	677.9	352.7	162.4	89.3	1	3557.1	674.94	349.57	159.3	86.377
10	3529	671.4	349.4	161.11	88.15	2	3555.3	673.99	348.66	158.96	85.892
100	3496	661.4	340	158.21	86.44						



Slika 46. Paralelni kapacitet C_P pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



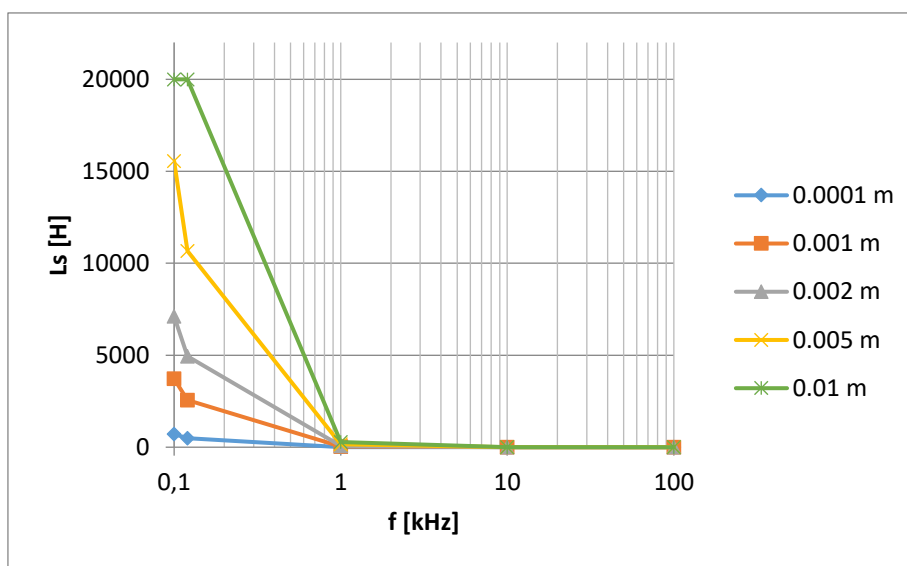
Slika 47. Paralelni kapacitet C_p pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Paralelni kapacitet C_p ima prilično slične karakteristike i rezultate kao serijski kapacitet sa minimalnim odstupanjima na nekim mjernim točkama. Kao i kod serijskog kapaciteta, najveća vrijednost paralelnog kapaciteta C_p izmjerena je pri najmanjem razmaku ploča d_1 i najniže frekvencije od 100 Hz te iznosi 3565 pF. Najmanja vrijednost paralelnog kapaciteta izmjerena je pri najvećem razmaku ploča d_5 i najvišoj mjernoj frekvenciji od 100 kHz a iznosi 86.44 pF. Karakteristika paralelnog kapaciteta C_p u odnosu na frekvenciju je gotovo konstantna, promjene su minimalne promjenom frekvencije i ne iznose više od 5% koliko je zabilježeno pri razmaku ploča d_3 .

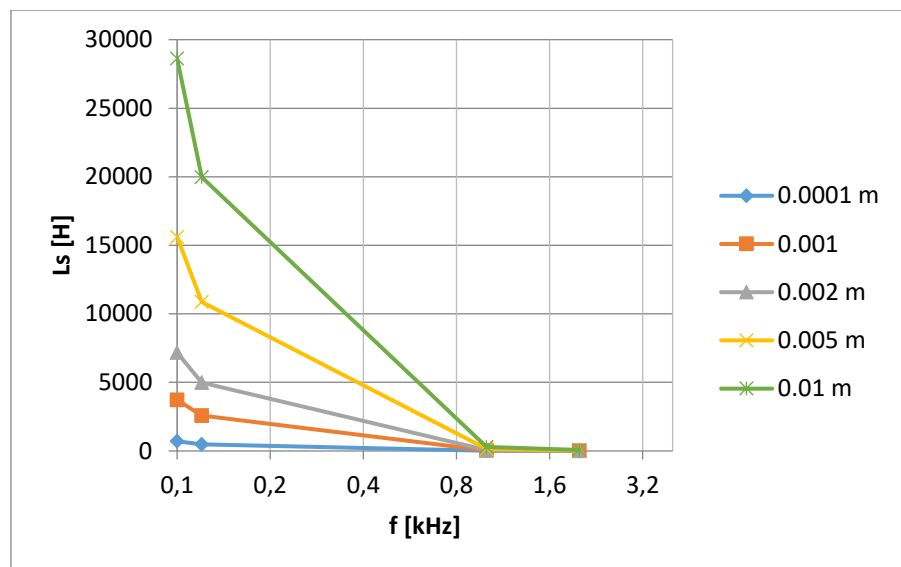
Razlike između mjernih rezultata mjerena dvama instrumentima su također minimalne a najveća razlika je zabilježena pri razmaku ploča d_5 na frekvenciji od 1kHz. Paralelni kapacitet izmjeren UT612 iznosi 89.3 pF dok kapacitet C_p izmjeren GW Instek mjernim uređajem iznosi 86.377 pF što čini razliku od 3%.

Tablica 15. Serijski induktivitet L_s pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW instek LCR-816					
f [kHz]	Ls [H]					f [kHz]	Ls [H]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	711.8	3719	7111	15551	20000	0.1	709.53	3723.6	7176	15608	28624
0.12	492.2	2565	4944	10660	20000	0.12	492.97	2588.3	4986.9	10875	19963
1	7.109	37.39	71.86	155.55	284.5	1	7.112	37.482	72.426	158.94	293.65
10	0.07129	0.3773	0.7255	1.574	2.877	2	1.7799	9.3957	18.142	39.853	73.276
100	0.00072	0.00383	0.00736	0.01602	0.02933						



Slika 48. Serijski induktivitet L_s pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



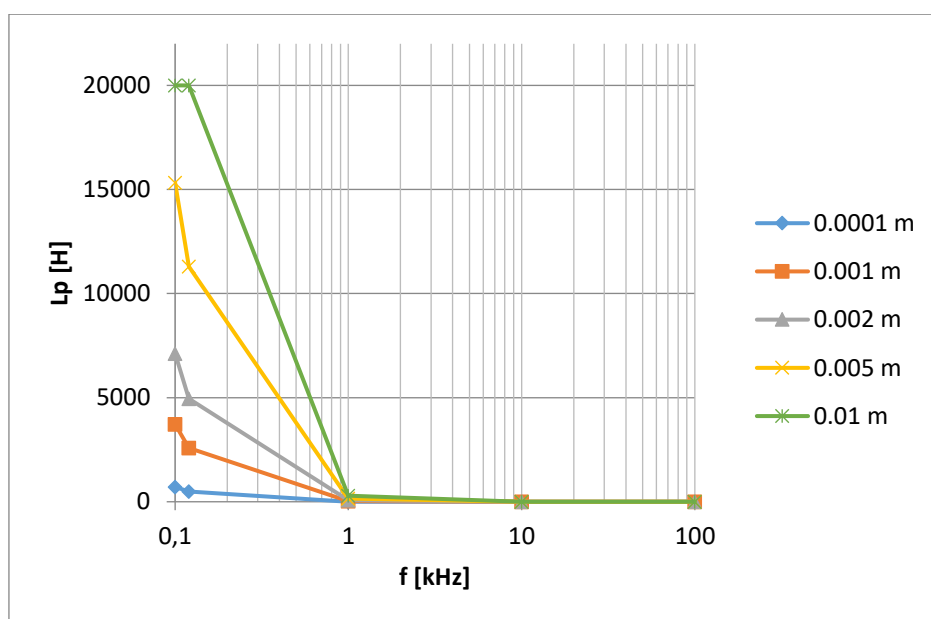
Slika 49. Serijski induktivitet L_S pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrikom izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Serijski otpor L_S bilježi veće vrijednosti pri nižim frekvencijama i većim razmacima između ploča. Povećavanje frekvencije vrijednosti L_S se smanjuju tako da minimalna izmjerena vrijednosti iznosi 720 μ H koja je zabilježena pri najmanjem razmaku ploča d_1 i najvišoj frekvencijskoj mjernoj točki od 100 kHz. Povećavanjem razmaka ploča odnosno smanjivanjem kapaciteta kondenzatora dolazi do povećanja serijskog induktiviteta L_S tako da maksimalna vrijednosti koja je izmjerena GW Instek LCR-816 uređajem iznosi 28624 H pri razmaku ploča d_5 . Uspoređujući rezultate pri frekvencijama od 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz može se primijetiti da su vrijednosti serijskog induktiviteta L_S gotovo 100 puta manje od prethodne frekvencijske mjerne točke, i to za sve razmake ploča, npr: pri razmaku ploča d_4 na frekvenciji od 100 Hz $L_S = 15551$ H, na 1 kHz $L_S = 155.55$ H, na 10 kHz $L_S = 1.574$ H dok je na frekvenciji od 100 kHz $L_S = 16.02$ mH izmjereno UT612 mjernim uređajem.

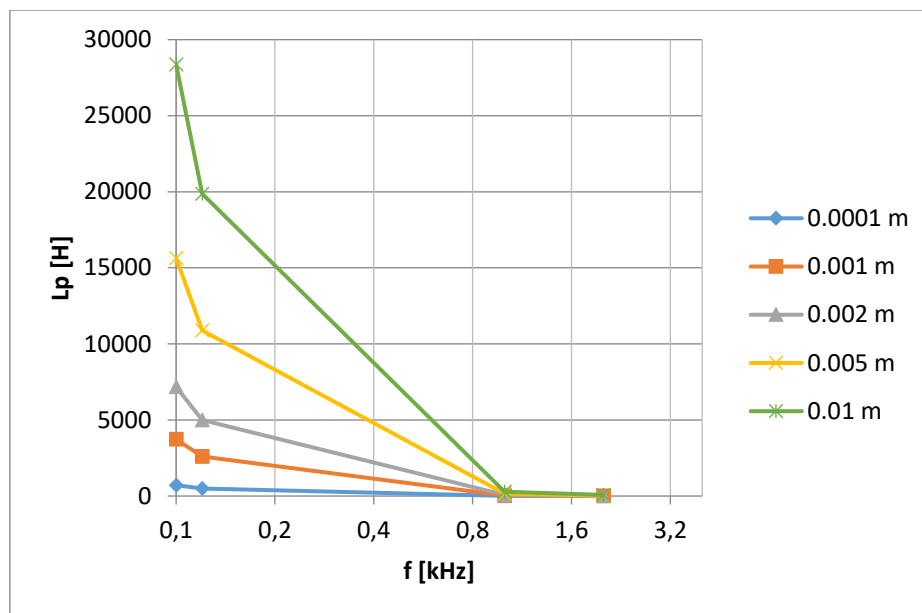
Mjerni uređaji su imali prilično slične rezultate sa vrlo malo odstupanja, pogotovo pri manjim razmacima ploča dok kod razmaka ploča d_5 pri frekvenciji od 100 Hz i 120 Hz nije moguće usporediti rezultate jer UT612 mjerni uređaj nije u mogućnosti izmjeriti induktivitete iznad 20 000 H.

Tablica 16. Paralelni induktivitet L_p pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Lp [H]					f [kHz]	Lp [H]				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	712.4	3720	7121	15318	20000	0.1	710.24	3725.7	7175.9	15646	28368
0.12	492.6	2587	4946	11293	20000	0.12	492.52	2588	4989.9	10877	19867
1	7.113	37.41	71.89	155.64	284.8	1	7.1136	37.499	72.449	158.99	293.16
10	0.07133	0.3777	0.7257	1.5732	2.877	2	1.779	9.3933	18.159	39.847	73.827
100	0.000703	0.00384	0.00737	0.01603	0.02933						



Slika 50. Paralelni induktivitet L_p pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



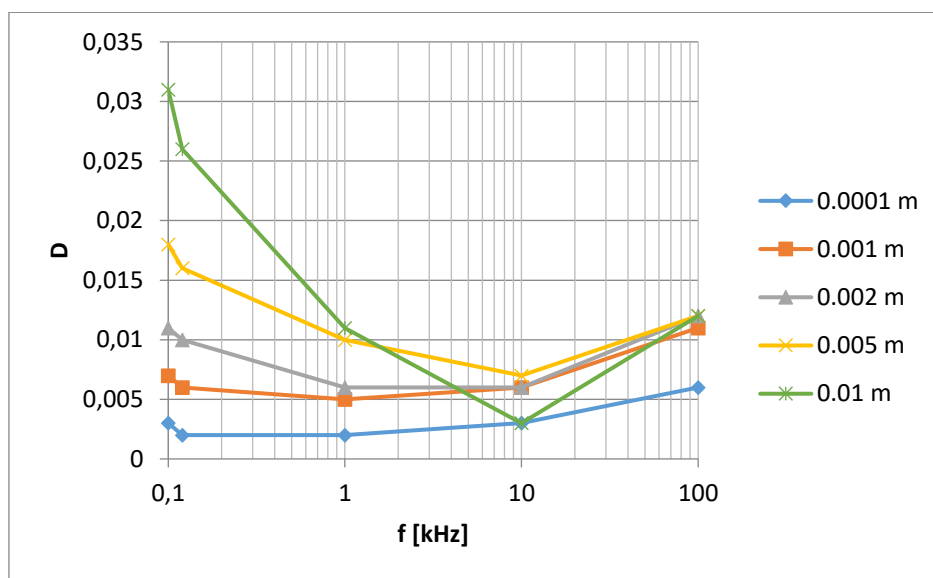
Slika 51. Paralelni induktivitet L_P pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Vrijednosti paralelnog otpora L_P vrlo su slične vrijednostima serijskog otpora L_S sa minimalnim odstupanjima. Za ovaj parametar također vrijedi da se vrijednosti L_P povećavaju dodavanjem broja folija između nabijenih ploča tako da je maksimalna vrijednost pri najvećem razmaku između ploča d_5 . Najveća izmjerena vrijednost L_P iznosi 28368 H izmjereno GW Instek LCR-816 uređajem pri najvećem razmaku ploča i najnižoj mjernoj frekvenciji od 100 Hz. S druge strane, pri najmanjem razmaku ploča d_1 na najvišoj frekvenciji imamo minimalne vrijednosti L_P . Najmanja vrijednost L_P izmjerena je UT612 mjernim uređajem pri razmaku ploča d_1 i najvišoj frekvenciji od 100 kHz te iznosi $L_P = 703 \mu\text{H}$.

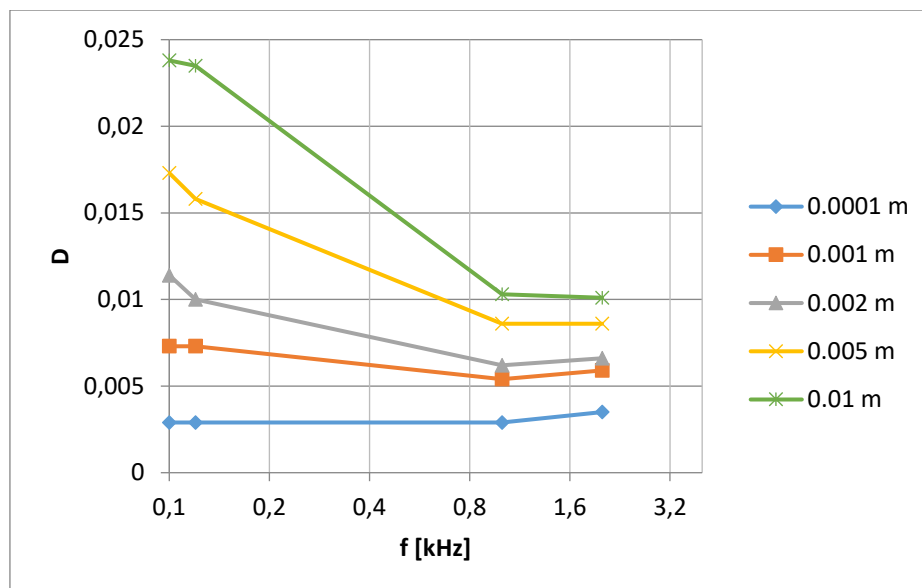
Razlike između izmjerenih vrijednosti dvaju instrumenata najmanje su pri manjim razmacima ploče dok pri većim razmacima ploče imamo najveću razliku mjerenja od 4%. Ta je razlika zabilježena pri razmaku ploče d_4 i frekvenciji od 120 Hz. Pri najvećem razmaku ploča d_5 i nižim frekvencijskim točkama od 100 Hz i 120 Hz nije moguća usporedba rezultata jer UT612 mjerni uređaj nije u mogućnosti mjeriti rezultate iznad 20000 H.

Tablica 17. Faktor disipacije D pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	D					f [kHz]	D				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	0.003	0.007	0.011	0.018	0.031	0.1	0.0029	0.0073	0.0114	0.0173	0.0238
0.12	0.002	0.006	0.01	0.016	0.026	0.12	0.0029	0.0073	0.01	0.0158	0.0235
1	0.002	0.005	0.006	0.01	0.011	1	0.0029	0.0054	0.0062	0.0086	0.0103
10	0.003	0.006	0.006	0.007	0.003	2	0.0035	0.0059	0.0066	0.0086	0.0101
100	0.006	0.011	0.012	0.012	0.012						



Slika 52. Faktor disipacije D pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



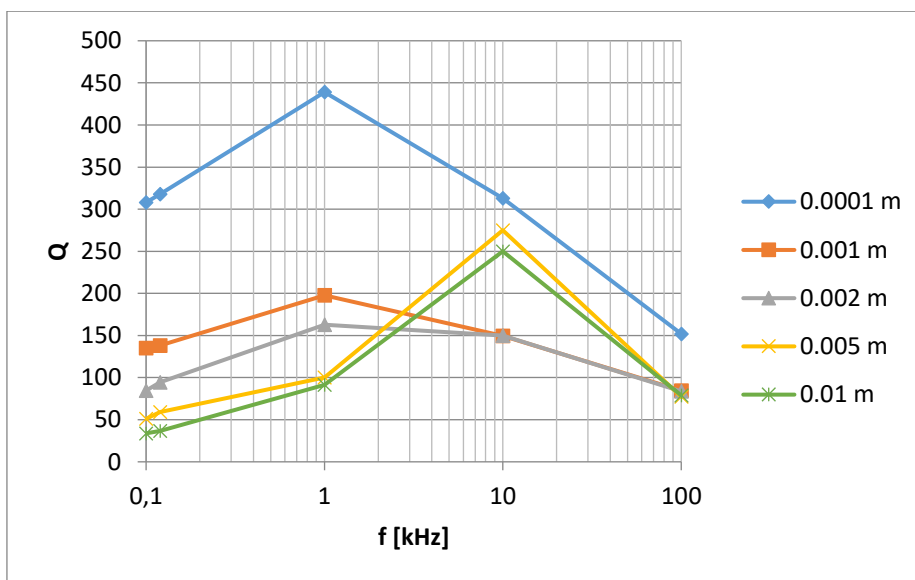
Slika 53. Faktor disipacije D pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Iz priloženih grafova i tablica može se primijetiti da su manje vrijednosti zabilježene pri manjem razmaku ploča, veći kapacitet, dok su veće vrijednosti zabilježene kod većih razmaka ploča. Najmanji faktor disipacije izmjeren je UT612 mjernim uređajem pri razmaku ploča d_1 i frekvencijama od 100 Hz i 120 Hz, $D = 0.002$. Najveća vrijednost je također izmjerena UT612 mjernim uređajem pri razmaku ploča d_5 i najnižoj mjernoj frekvenciji od 100 Hz. Kod svih razmaka ploča u početku je zabilježen pad vrijednosti faktor disipacije D porastom frekvencije da bi nakon toga na određenoj frekvenciji vrijednosti počele rasti. Pri razmaku ploča d_1 , d_2 i d_3 najmanje vrijednosti faktora disipacije zabilježene su do frekvencije 1 kHz nakon čega opet počinje rasti. Kod razmaka ploča d_4 i d_5 najmanje vrijednosti faktora disipacije su zabilježene na frekvencijama oko 10 kHz. Može se primijetiti da se smanjenjem kapaciteta kondenzatora odnosno povećavanjem razmaka između ploča povećava frekventijsko područje na kojem kondenzator ima najmanje gubitke. Kod razmaka d_1 to je područje oko 1 kHz dok je za razmak ploča d_5 to je frekventijsko područje oko 10 kHz.

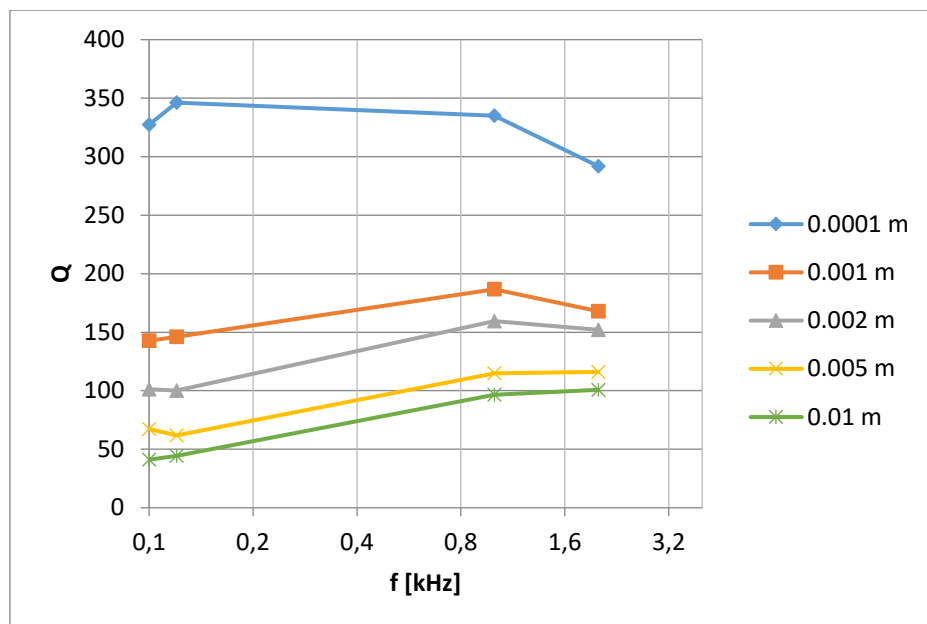
Mjerni uređaji prilikom mjerenja faktora disipacije imali su značajnija odstupanja prilikom mjerenja. Razlike su bile očite i kod malih razmaka ploča kao i većih razmaka ploča ali i kod različitih frekvencija. Najveća razlika izmjerenih rezultata zabilježena je kod razmaka ploča d_1 na frekvencijama od 120 Hz i 1 kHz gdje su izmjerene vrijednosti 0.002 UT612 mjernim uređajem odnosno 0.0029 GW Instek LCR-816 mjernim uređajem.

Tablica 18. Faktor dobrote Q pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	Q					f [kHz]	Q				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	308	135.1	84.6	51.1	33.8	0.1	327.4	142.7	101.2	67.36	41.07
0.12	318	138.1	94.6	59.3	36.6	0.12	346.2	146	100.2	61.84	44.46
1	439	197.7	162.8	100	91.3	1	335.1	186.7	159.5	114.9	96.46
10	313	149.5	150.1	275	250	2	291.9	167.9	152	116.1	100.8
100	152	84.5	83.7	77.5	78.7						



Slika 54. Faktor dobrote Q pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



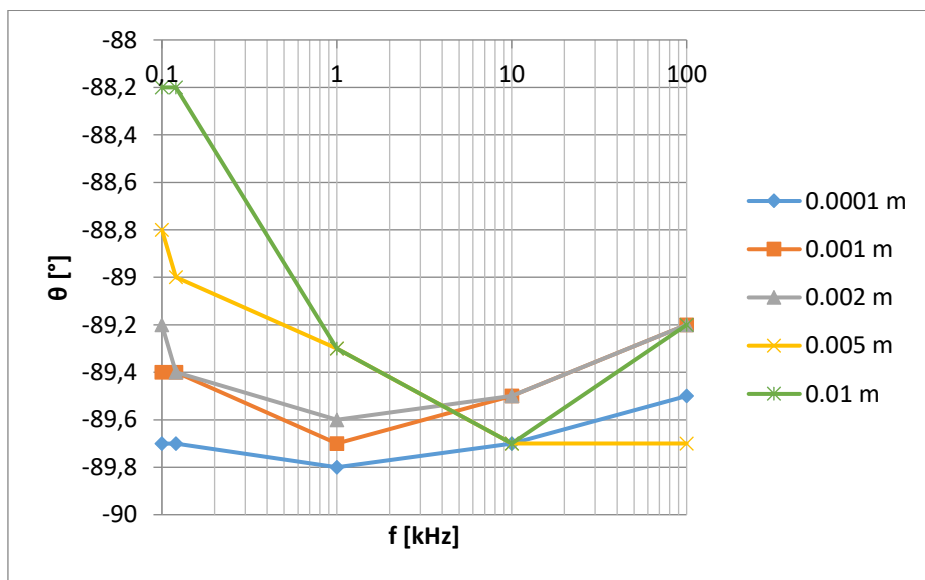
Slika 55. Faktor dobrote Q pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Analogno faktoru disipacije, faktor dobrote Q ima slične karakteristike kao prethodni parametar. Uočljivo je kako faktor dobrote prvotno raste do određene frekvencije nakon čega slijedi pad vrijednosti. Najveća vrijednost faktora dobrote izmjerena je UT612 mjernim uređajem na frekvenciji od 1 kHz pri razmaku ploča d_1 $Q = 439$ dok je najmanje vrijednost izmjerena pri najvećem razmaku d_5 i najnižoj frekvenciji od 100 Hz, $Q = 33.8$. Pri razmacima ploča d_1 , d_2 i d_3 najveće vrijednosti su izmjerene na frekvenciji od 1 kHz dok pri razmacima d_4 i d_5 najveće vrijednosti faktora dobrote zabilježene su pri frekvenciji od 10 kHz. Povećavanjem razmaka ploča smanjuje se faktor dobrote Q tako da pri frekvenciji od 1 kHz i razmaku ploča d_1 $Q = 439$, za d_3 $Q = 192.8$ i d_5 $Q = 91.3$ izmjereno UT612 mjernim uređajem.

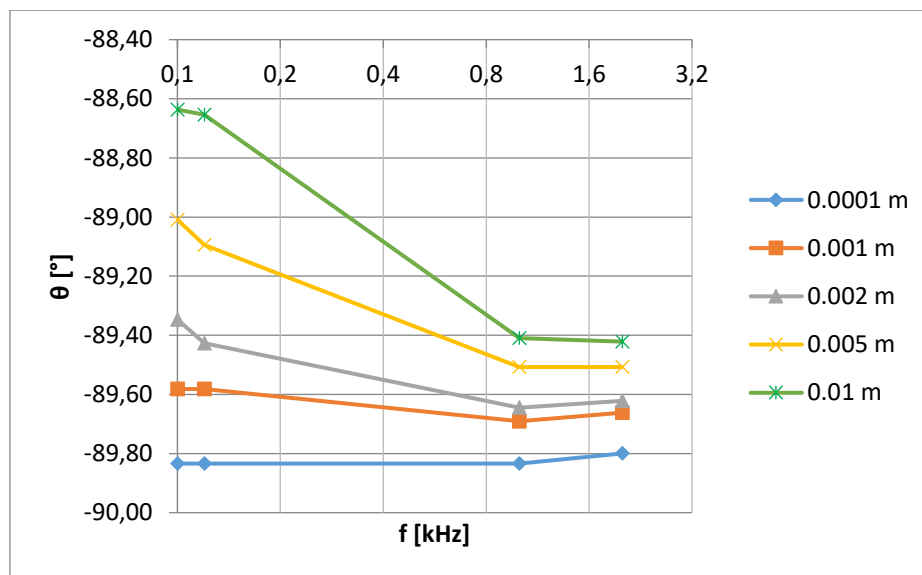
Primjećuju se osjetnije razlike između mjernih rezultat dvaju uređaja tako da je maksimalna razlika bila 31% na frekvenciji od 1 kHz i razmaku ploča d_1 gdje je UT612 mjerni uređaj izmjerio $Q = 439$ dok je GW Instek LCR-816 izmjerio 335.1.

Tablica 19. Kut faznog pomaka θ pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije izmjeren UT612 i GW Instek LCR-816

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	θ					f [kHz]	θ				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	-89.7	-89.4	-89.2	-88.8	-88.2	0.1	-89.83	-89.58	-89.35	-89.01	-88.64
0.12	-89.7	-89.4	-89.4	-89	-88.2	0.12	-89.83	-89.58	-89.43	-89.09	-88.65
1	-89.8	-89.7	-89.6	-89.3	-89.3	1	-89.83	-89.69	-89.64	-89.51	-89.41
10	-89.7	-89.5	-89.5	-89.7	-89.7	2	-89.80	-89.66	-89.62	-89.51	-89.42
100	-89.5	-89.2	-89.2	-89.7	-89.2						



Slika 56. Kut faznog pomaka θ pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren UT612 uređajem



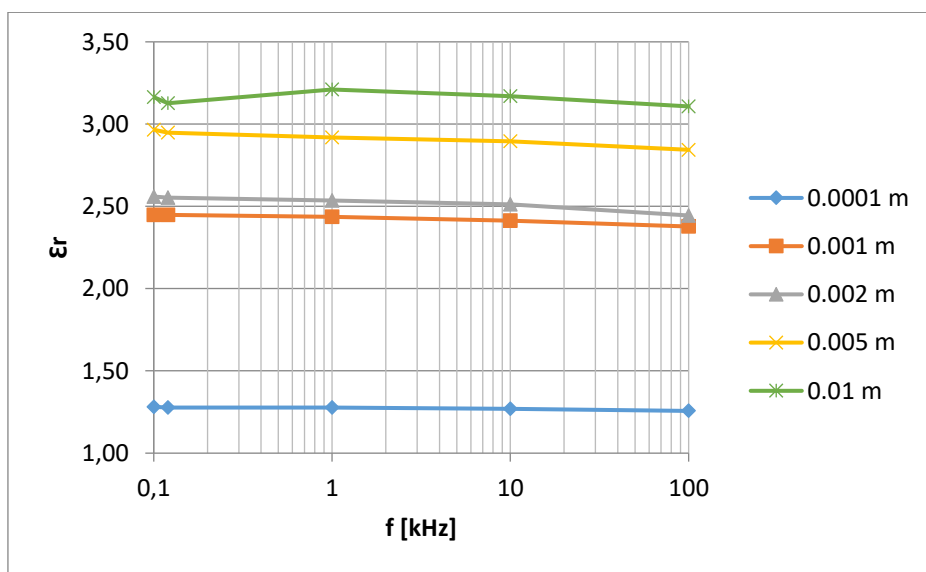
Slika 57. Kut faznog pomaka θ pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Prema priloženoj tablici i grafovima možemo primijetiti kako je kut faznog pomaka vrlo blizu idealnog kuta od -90° . Najmanji kut i najveće odstupanje od idealnog kuta zabilježeno je pri najvećem razmaku ploča d_5 i najnižoj frekvenciji od 100 Hz. Izmjeren je kuta faznog pomaka $\theta = -88.2^\circ$ što čini razliku od 2% od idealnog kuta. Najmanje odstupanje od idealnog kuta gdje su i najmanji gubici zabilježeno je kod d_1 razmaka ploče i frekvenciji od 1 kHz. Izmjerena vrijednost faznog pomaka $\theta = -89.83^\circ$ GW Instek LCR-816 mjernim uređajem čini 0.19% razlike od idealnog faznog pomaka. I ovdje je primjetno kako se kuta faznog pomaka povećava do određene frekvencije nakon čega slijed pad vrijednosti. Kod razmaka ploča d_1 , d_2 i d_3 najbolje vrijednosti kuta faznog pomaka izmjerene su pri frekvenciji od 1 kHz dok su za razmak ploča d_4 i d_5 najbolji fazni kutevi izmjereni na frekvenciji od 10 kHz.

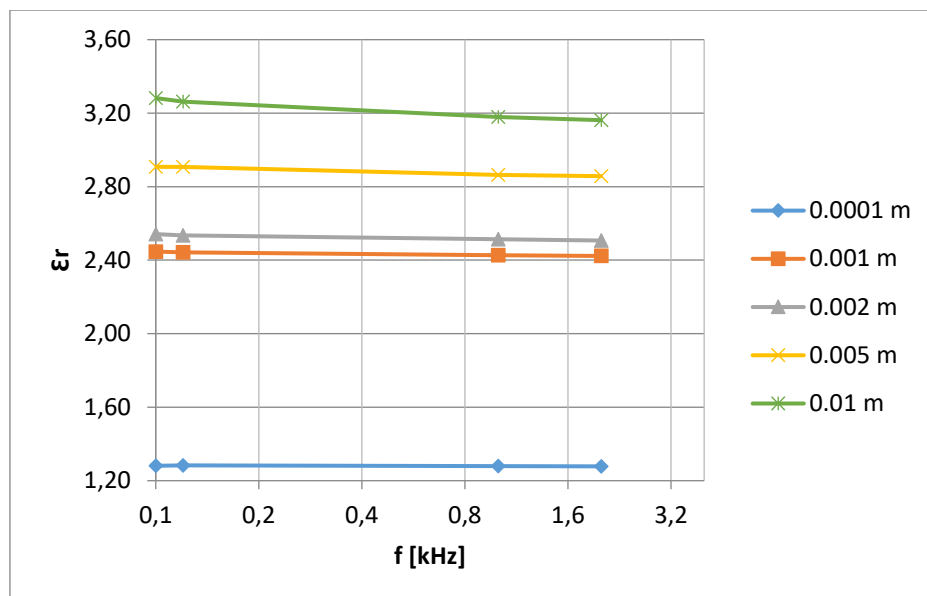
Kao što je veće ranije naglašeno, GW Instek LCR-816 uređaj nema mogućnost mjerenja kuta faznog pomaka θ pa su rezultati iz grafa dobiveni preko formule $\tan \delta = D = \tan(90 - \theta)^\circ$. Usporedbom dvaju instrumenata može se primijetiti da su razlike minimalne pri čemu je najveća razlika od 1% zabilježena pri razmaku d_5 i frekvenciji od 120 Hz.

Tablica 20. Izračunata relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa dielektrikom od termoplastične folije

UT-612						GW Instek LCR-816					
f [kHz]	ϵ_r					f [kHz]	ϵ_r				
	d1	d2	d3	d4	d5		d1	d2	d3	d4	d5
	0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m		0.0001 m	0.001 m	0.002 m	0.005 m	0.01 m
0.1	1.28	2.45	2.56	2.97	3.16	0.1	1.28	2.45	2.54	2.91	3.28
0.12	1.28	2.45	2.55	2.95	3.13	0.12	1.28	2.44	2.53	2.91	3.26
1	1.28	2.44	2.54	2.92	3.21	1	1.28	2.43	2.51	2.86	3.18
10	1.27	2.41	2.51	2.90	3.17	2	1.28	2.42	2.51	2.86	3.16
100	1.26	2.38	2.44	2.84	3.11						



Slika 58. Relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjereno UT612 uređajem



Slika 59. Relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik izmjeren GW Instek LCR-816 uređajem

Relativna dielektrična konstanta ϵ_r pločastog kondenzatora sa termoplastičnom folijom kao dielektrik određena je prema izrazu (4-1) uz izmjerene vrijednosti za paralelni kapacitet C_p pri određenim razmacima ploče d . Folija korištena kao dielektrik napravljena je od termoplastičnog polimera koji zbog svoje strukture i građe ima polarizacijske mehanizme koji mogu pratiti promjene električnog polja na različitim frekvencijama [26]. Prema [25] folije za printanje rade se prozirnih termoplastičnih materijala kao što su polietilen tereftalat (PET), polipropilen (PP), polistiren (PS), polivinil klorid (PVC), polimetilmetakrilat (PMA ili Plexiglas), polikarbonat (PC), polietilen (PE). Svi ovi materijali imaju male dielektrične konstante i faktor disipacije te se većina materijala zbog dielektričnih svojstava koristi kao dielektrik u kondenzatorima ili izolacijska zaštita [26]. Vrijednosti relativne dielektrične konstante ϵ_r dobivene izračunom odgovaraju dielektričnim konstantama navedenih materijala te njihovim dielektričnim svojstvima [26] [27] [28]. Može se uočiti iz grafova i tablica da se vrijednosti dielektrične konstante neznatno mijenja promjenom frekvencije, pogotovo pri manjim razmacima ploče. Pri najmanjem razmaku ploča d_1 zabilježene je razlika od 1.5% u odnosu na najveću vrijednost (1.28) na najmanju vrijednosti (1.26) koja je zabilježena pri najvišoj frekvenciji od 100 kHz. Te su se razlike povećavale do razmaka ploča d_3 gdje je razlika bila 4.91% nakon čega su počele opadati. Povećanjem debljine folije odnosno razmaka između ploča raste relativna dielektrična konstanta tako da pri razmaku ploča d_5 zabilježena najveća vrijednosti dielektrične konstante od 3.21.

Oba instrumenta mjerili su slične vrijednosti pogotovo pri manjim razmacima između ploča. Najveće razlike dielektrične konstante zabilježene su pri razmaku ploča d_5 i najnižim frekvencijama od 100 Hz i 120 Hz gdje razlike između rezultata iznose 4%.

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisano određivanje dielektrične konstante metodom mjerenja kapaciteta pločastog kondenzatora. Dielektrična konstanta važan je faktor prilikom dizajna i konstruiranja različitih električnih naprava ponajviše kondenzatora. Za određivanje dielektrične konstante postoje nekoliko mjernih tehnika koje su opisane u radu. Jedna od tehnika je metoda sa pločastim kondenzatorom pogodna za određivanje dielektrične konstante pri frekvencijama do 1 GHz.

Pločasti kondenzator korišten u eksperimentalnim mjerenjima sastoji se od dvaju bakrenih diskova između kojih se nalazi dielektrik. Papir i folija od termoplastičnog polimera su korišteni kao dielektrici te su pomoću dvaju uređaja mjereni kapacitet kondenzatora zajedno sa ostalim mjernim veličinama. Najniža mjerna frekvencija je 100 Hz dok je najviša frekvencija korištena u mjerenjima iznosila 100 kHz. Kapacitet i ostale mjerne veličine izmjerene su direktno dok se relativna dielektrična konstanta ϵ_r izračunava pomoću izmjerenih vrijednosti paralelnog kapaciteta C_P .

Uočava se da relativna dielektrična konstanta papira ima veću vrijednost od relativne dielektrične konstante termoplastične folije. Posljedica je to različite strukture i izvedbe materijala od čega su napravljeni navedeni dielektrici. Primjetno je da se relativna dielektrična konstanta ϵ_r papira značajnije smanjuje porastom frekvencije (34% razlike između najveće i najmanje vrijednosti za d_1 te 88% razlike između najveće i najmanje vrijednosti za d_5) dok relativna dielektrična konstanta ϵ_r termoplastične folije ima neznatne promjene (1.6% razlike između najveće i najmanje vrijednosti za d_1 odnosno 4.91% razlike između najveće i najmanje vrijednosti za d_3). Povećavanjem razmaka između ploča povećava se dielektrična konstanta medija što je posljedica smanjenja pripadnih paralelnih kapaciteta C_P . Papir na istoj frekvenciji pri najmanjem i najvećem razmaku ploča ima razliku između relativne dielektrične konstante ϵ_r od 50% (frekvencija 100 kHz) do 110% (frekvencija 100 Hz). To nam govori da debljina dielektrika značajnije utječe na dielektričnu konstantu papira pri nižim frekvencijama dok se na višim frekvencijama ta razlika smanjuje odnosno vidi se utjecaj frekvencije na dielektričnu konstantu. Kod folije od termoplastičnog polimera razlike relativne dielektrične konstante ϵ_r između najmanjih i najvećih razmaka ploča su promjenom frekvencije prilično konstante i iznose prosječno 148%. Dobiveni rezultati relativne dielektrične konstante ϵ_r za termoplastičnu foliju odgovaraju vrijednostima iz literature [26][27][28] dok su vrijednosti dielektrične konstante za papir približno jednake vrijednostima iz literature [24] pogotovo pri manjim razmacima ploča. Karakteristike nadomjesnih parametara kondenzatora, otpor i induktivitet za oba

dielektrika su sličnog karaktera. Vrijednosti ovih parametara rastu povećavanjem razmaka između ploča ali se smanjuju porastom frekvencije. Papir ima višestruko veće vrijednosti serijskog otpora R_s u odnosu na termoplastičnu foliju dok je situacija suprotna kod vrijednosti za paralelni otpor R_p , serijski induktivitet L_s i paralelni induktivitet L_p . Kapacitet pločastog kondenzatora sa dielektrikom od papira ima veće vrijednosti od pločastog kondenzatora sa folijom ali i veće razlike između izmjerenih vrijednosti porastom frekvencije. Kapacitet pločastog kondenzatora sa folijom je gotov konstantan promjenom frekvencije. U oba slučaja kapacitet, serijski i paralelni, se smanjuju povećavanjem razmaka između ploča odnosno dodavanjem većeg broja papira ili folije.

Osim što ima bolja električna svojstva, folija od termoplastičnog polimera ima bolja i dielektrična svojstva što se može zaključiti prema vrijednostima za faktor disipacije D , faktor dobrote Q i faznom pomaku θ . Kondenzator sa termoplastičnom folijom ima male vrijednosti faktora disipacije (0.002 – 0.031), velike vrijednosti faktora dobrote (33.8 – 439) i gotovo idealne vrijednosti kuta faznog pomaka θ (-88.2° do -89.8°) koje se neznatno mijenjaju promjenom razmaka između ploča i frekvencije. Papir ima veće vrijednosti ovih parametara koji se poboljšavaju povećavanjem frekvencije ali su i dalje veće razlike u odnosu na foliju od termoplastičnog polimera.

Određivanje relativne dielektrične konstante metodom pločastog kondenzatora ne zahtijeva složeni i skupocjeni laboratorijski postav kojim se vrlo točno može doći do mjernih rezultata. Metoda je ograničena frekvencijskim opsegom te se ne mogu ispitivati uzorci iznad 1 GHz sa zadovoljavajućom točnošću. Korišteni mjerni uređaji u ovom radu su još manjeg frekvencijskog opsega (100 kHz najveća mjerna frekvencija) ali ipak dovoljnog opsega kako bi se opisali svojstva i tendencije ispitivanih uzoraka. Za relevantnije rezultate na višim frekvencijama potrebne su aproksimacije i dodatne kalkulacije.

Predmet budućih ispitivanja mogu biti različiti dielektrični materijali koji svoju primjenu nalaze u visokofrekvencijskim krugovima kao što su keramički ili polimerni materijali. Za ispitivanja u radiofrekvencijskom spektru potreban je odgovarajući uređaj koji ima mogućnost mjeriti u tom području uz uvjet nabavke takvog uređaja.

SAŽETAK

Rad opisuje određivanje dielektrične konstante metodom pločastog kondenzatora. Dielektrična konstanta, realni dio kompleksne dielektričnosti, od velikog je značaja za konstruiranje visokofrekvencijskih naprava. U prvom dijelu opisana je dielektrična konstanta i razne metode za određivanje iste. Nakon toga opisana je metoda sa pločastim kondenzatorom uz laboratorijski postav korišten u mjerenjima. Korišteni dielektrični materijali pločastog kondenzatora su papir i folija od termoplastičnog polimera. Osim dielektrične konstante mjereni su i nadomjesni parametri čiji su rezultati prikazani tablično i grafički.

Ključne riječi: dielektrična konstanta, pločasti kondenzator, kapacitet, faktor disipacije, papir, folija od termoplastičnog polimera, RLC metar

ABSTRACT

Determination of dielectric constant using parallel plate capacitor method is described in this paper. Dielectric constant, real part of complex permittivity, is of great significance for construction of high frequency circuits. Dielectric constant and various methods for its determination are described in first part of the paper. Parallel plate capacitor method with laboratory setup is described in the next chapter of the paper. The paper and foil of thermoplastic polymer were used as dielectric materials in parallel plate capacitor. Apart of dielectric constant, equivalent parameters of parallel plate capacitor were measured and presented grafically and tabularly.

Keywords: dielectric constant, parallel plate capacitor, capacitance, loss factor, paper, foil of thermoplastic polymer, RLC meter

LITERATURA

- [1] Nelson, S.O.: „*Dielectric properties measurement techniques and applications*“, Transactions of the ASAE 1999., v.42 no. 2, str. 523
- [2] Brodie, G., Jacob, M.V., Farrell, P.: „*Microwave and Radio-Frequency Technologies in Agriculture: An Introduction for Agriculturalists and Engineers*“, De Gruyter Open Ltd, Warsaw/Berlin, 2015., str. 52-77
- [3] Wee, F.H., Soh, P.J., Suhaizal, A.H.M., Nornikman, H., Ezanuddin A.A.M.: „*Free Space Measurement Tehnique on Dielectric Properties of Agricultural Residues at Microwave Frequencies*“, School of Computer and Communication, Universiti Malasya Perlis, Conference: Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009.
- [4] Tereshchenko O.V., Buesink F.J.K., Leferink F.B.J.; „*An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials*“, 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, Istanbul, Turkey, 13-20 August 2011.
- [5] Rupčić, S., Mandrić Radivojević, V., Srnović, M., Benšić, G.: „*Measuring the Dielectric Constant of Paper Using a Parallel Plate Capacitor*“, IJECES, Vol. 9, No. 1, 2018.
- [6] Agilent Technologies, Inc.: „*Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials*“, Application Note, 5989-2589EN, 2006.
- [7] Ganchev, S.: „*Materials Measurement Techniques & Applications*“, Americas TM Contact Center, Agilent Technologies, SAD, 2006.
- [8] Venkatesh, M.S., Raghavan G.S.V.: „*An overview of dielectric properties measuring techniques*“, Canadian Biosystems Engineering, Vol. 47, 2005., str. 15-30
- [9] Kuzmanović, B.: „*Osnove elektrotehnike I*“, Element, Zagreb, 2000.,
- [10] Walker, J., Halliday, D., Resnick, R.: „*Fundamentals of physics – 10th edition*“, John Wiley & Sons, Inc., SAD, 2014., str. 717
- [11] https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/313513/mod_folder/content/0/6_Elektricni_Kapacitet.pdf?forcedownload=1 (pristupio 14.03.2018.)

- [12] Young, H.D., Freedman, R.A.: „*Sear's and Zemanky's University physics with Modern physics – 14th Edition*“, Pearson Education, Inc., SAD, 2016.
- [13] http://www.pfst.unist.hr/~ivujovic/stare_stranice/pdf_zip_word/pred_dielek_mat.pdf (pristupio 04.04.2018.)
- [14] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/Electrolytic_capacitor_model.svg/325px-Electrolytic_capacitor_model.svg.png (pristupio 15.05.2018.)
- [15] Sarjeant, W.J.: „*Capacitors*“, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 5, 1990.
- [16] KEMET Corporation: „*Introduction to Capacitor Technologies: What is a Capacitor*“, 2013.
- [17] Deshpande, R. P.: „*Capacitors*“, McGraw-Hill Education (India) Private Limited, 2015.
- [18] Sarjeant, W.J.: „*Capacitor Fundamentals*“, Proceedings of the 19th Electrical Electronics Insulation Conference, Chicago, SAD, 1989.
- [19] Keysight Technologies: „*Solutions for Measuring Permittivity and Permeability with LCR Meters and Impedance Analyzers*“, Application Note, 5990-2862EN, 2017.
- [20] Borch, J., Lyne, M.B., Mark, R.E., Habeger, C.C.Jr.: „*Handbook of Physical Testing of Paper Volume 2*“, Marcel Dekker, Inc., SAD, 2001.
- [21] <https://www.uni-trend.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=241&id=327> (pristupio 16.06.2018.)
- [22] <https://www.gwinstek.com/en-global/products/downloadSeriesDownNew/13502/766> (pristupio 16.06.2018.)
- [23] Poole, C., Darwazeh, I.: „*Microwave Active Circuit Analysis and Design*“, Elsevier Ltd., SAD, 2016.
- [24] Torgovnikov, G.I.: „*Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials*“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.
- [25] <https://patents.google.com/patent/US5413854A/en> (pristupio 20.02.2019.)
- [26] Osswald, T.A., Baur, E., Brinkmann, S., Oberbach, K., Schmachtenberg, E.: „*International Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers*“, Hanser Publishers, Munich, 2006.

[27]<https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/ElectricalPropertiesofPlastics.pdf>
(pristupio 21.04.2019.)

[28]<https://www.dixonvalve.com/sites/default/files/product/files/brochures-literature/dielectric-constant-values.pdf> (pristupio 21.04.2019.)

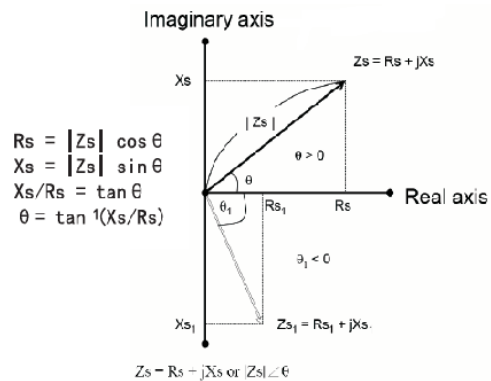
PRILOG

Specifikacije i značajke UT612 LCR metra



Measurement range and Accuracy

L:20mH ---2000H	Best accuracy: (0,5%+5)
C:200pF---20mF	Best accuracy: (0,5%+5)
R:20 Ω ----200M Ω	Best accuracy: (0,3%+5)



Function	Measurement mode	Frequency	Range	Min. resolution	Accuracy: ±(a% of reading +b digits) (under 18°C to 28°C)
L Inductance gear	Ls/Lp	100Hz/120Hz	20.000mH	1uH	± (1.0%+5)
			200.00mH	0.01mH	± (0.5%+5)
			2000.0mH	0.1mH	± (0.5%+5)
			20.000H	1mH	± (0.5%+5)
			200.0H	0.01H	± (1.0%+5)
			2000.0H	0.1H	± (1.0%+5)
		1KHz	2000.0uH	0.1uH	± (1.0%+5)
			20.000mH	1uH	± (0.5%+5)
			200.00mH	0.01mH	± (0.5%+5)
			2000.0mH	0.1mH	± (1.0%+5)
			20.000H	1mH	± (1.0%+5)
			200.00H	0.01H	± (2.0%+5)
		10KHz	20.000uH	0.01uH	± (1.0%+5)
			200.00uH	0.01uH	± (1.0%+5)
			2000.0uH	0.1uH	± (0.5%+5)
			20.00mH	1uH	± (0.5%+5)
		100KHz	20.000uH	0.001uH	± (2.0%+5)
			200.00uH	0.01uH	± (2.0%+5)
			2000.0uH	0.1uH	± (2.0%+5)

Function	Measurement mode	Frequency	Range	Min. resolution	Accuracy: $\pm(a\% \text{ of reading} + b \text{ digits})$ (under 18°C to 28°C)
CAP Capacitance gear	Cs/Cp	100Hz/120Hz	20.000nF	1pF	$\pm (2.0\%+5)$
			200.00nF	0.01nF	$\pm (0.5\%+5)$
			2000.0nF	0.1nF	$\pm (0.5\%+5)$
			20.000uF	1nF	$\pm (0.5\%+5)$
			200.00uF	0.01uF	$\pm (1.0\%+5)$
			2000.0uF	0.1uF	$\pm (2.0\%+5)$
		1KHz	2000.0pF	0.1pF	$\pm (1.0\%+5)$
			20.000nF	1pF	$\pm (1.0\%+5)$
			200.00nF	0.01nF	$\pm (0.5\%+5)$
			2000.0nF	0.1nF	$\pm (0.5\%+5)$
			20.000uF	1nF	$\pm (0.5\%+5)$
			200.00uF	0.01uF	$\pm (1.0\%+5)$
			2000.0uF	0.1uF	$\pm (1.0\%+5)$
		10KHz	2000.0pF	0.1pF	$\pm (1.0\%+5)$
			20.000nF	1pF	$\pm (1.0\%+5)$
			200.00nF	0.01nF	$\pm (1.5\%+5)$
			2000.0nF	0.1nF	$\pm (2.0\%+5)$
		100KHz	2000.0pF	0.1pF	$\pm (2.0\%+5)$
			20.000nF	1pF	$\pm (2.0\%+5)$
			200.00nF	0.01nF	$\pm (5.0\%+5)$

Function	Measurement mode	Frequency	Range	Min. resolution	Accuracy: $\pm(a\% \text{ of reading} + b \text{ digits})$ (under 18°C to 28°C)
R Resistance gear	Rs/Rp	100Hz/120Hz	200.00Ω	0.01Ω	$\pm (1.0\%+5)$
			2.0000kΩ	0.1Ω	$\pm (0.3\%+5)$
			20.000kΩ	1Ω	$\pm (0.3\%+5)$
			200.00kΩ	0.01kΩ	$\pm (0.5\%+5)$
			2.0000MΩ	0.1kΩ	$\pm (1.0\%+5)$
			20.000MΩ	1kΩ	$\pm (2.0\%+5)$
		1KHz	20.000Ω	0.001Ω	$\pm (1.0\%+5)$
			200.00Ω	0.01Ω	$\pm (1.0\%+5)$
			2.0000kΩ	0.1Ω	$\pm (0.3\%+5)$
			20.000kΩ	1Ω	$\pm (0.3\%+5)$
			200.00kΩ	0.01kΩ	$\pm (0.5\%+5)$
			2.0000MΩ	0.1kΩ	$\pm (1.0\%+5)$
			20.000MΩ	1kΩ	$\pm (2.0\%+5)$
		10KHz	20.000Ω	0.001Ω	$\pm (1.0\%+5)$
			200.00Ω	0.01Ω	$\pm (1.0\%+5)$
			2.0000kΩ	0.1Ω	$\pm (0.3\%+5)$
			20.000kΩ	1Ω	$\pm (0.5\%+5)$
			200.00kΩ	0.01kΩ	$\pm (1.0\%+5)$
			2.0000MΩ	0.1kΩ	$\pm (2.0\%+5)$
		100KHz	20.000Ω	0.001Ω	$\pm (2.0\%+5)$
			200.00Ω	0.01Ω	$\pm (2.0\%+5)$
			2.0000kΩ	0.1Ω	$\pm (1.0\%+5)$
			20.000kΩ	1Ω	$\pm (2.0\%+5)$
	DCR		200.00Ω	0.01Ω	$\pm (1.0\%+5)$

Specifikacije i značajke GW Instek 816-LCR metra



Specifications

Specification accuracy is only applicable when the LCR meter has been warmed up for 30 minutes with an operating temperature of 18°C ~28°C.

Measurement Parameters	Inductance (Ls/Lp)*, Capacitance (Cs/Cp), Resistance (Rs/Rp), Dissipation (D), Quality Factors (Q), Equivalent Series Resistance (ESR) and Equivalent Parallel Resistance (EPR), Impedance (Z), Phase angle of Impedance [degree] (θ).		
Measurement Modes	R/Q, C/D, C/R, L/Q, Z/θ, L/R		
Display Ranges	Primary Display	Inductance (L)	0.00001mH ~ 99999H
		Capacitance (C)	0.00001pF ~ 99999 μF
		Resistance (R)	0.00001 Ω ~ 99999k Ω
		Absolute of Impedance (Z)	0.00001 Ω ~ 99999k Ω
	Secondary Display	Dissipation factor (D)*	0.0001 ~ 9999
		Quality factor (Q)**	0.0001 ~ 9999
		Phase angle of Impedance (degree)	-180.00° ~ 180.00°
		Equivalent Series Resistance (ESR)*	0.0001 Ω ~ 9999 k Ω
		Equivalent Parallel Resistance (EPR)*	0.0001 Ω ~ 9999 k Ω

Dissipation factor (D)⁺
in ppm

Quality factor (Q)^{**}
in ppm

DELTA % 0.00001% ~ 99999%

*s=series, p=parallel ESR=Rs

** with L or R

+ with C

Note: Only LCR-821 has Z/θ and L/R measurement parameters.

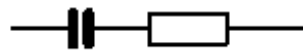
If any of these quantities is negative, the “-” negative indicator is displayed.

Accuracy	LCR-821/819/817	
	R, L, C, Z	0.05%(Basic)
	D, Q	0.0005 (Basic)
	θ	0.03° (Basic)
	LCR-829/827/826/816	
	R, L, C, Z	0.10%(Basic)
	D, Q	0.001
	Please refer to the accuracy definition on page132 for details.	
Basic Accuracy	0.05%	LCR-821/819/817
	0.1%	LCR-829/827/826/816
Test Frequency	LCR-821	12Hz–200kHz (504 Steps)
	LCR-819/829	12Hz–100kHz (503 Steps)
	LCR-817/827	12Hz–10kHz (489 Steps)
	LCR-816/826	100Hz–2kHz (245 Steps)
Measurement displays	Value	R/Q, C/D, C/R, L/Q, Z/ θ, L/R
		*The resolution of primary display (L, C, R or Z) is five digits.
		*The resolution of secondary display (D, Q, R with C, or R with L) is four digits.
		*The resolution of secondary display (θ) is 2 digits after decimal place.

	Delta%	DELTA% shows the percent deviation of the measured L, C, R or Z value from a saved NOMINAL VALUE. The deviation is indicated.	
	Delta	Delta is similar to the DELTA% except that the deviation is shown in suitable units (ohms, henries, etc.)	
Measurement Speed	Speed	LCR-816/817/819/821	LCR-826/827/829
	Slow	896ms	Please refer to the Handler timing diagram on page 119 for details.
	Medium	286ms	
	Fast	135ms	
Equivalent circuit	Parallel	L/R, L/Q, C/D, C/R, R/Q	
	Serial	L/R, L/Q, C/D, C/R, R/Q, Z/θ	
Trigger	Auto/Manual		
Average	1-255		
Battery	3V-DC lithium ion (*BR-2/3A) used for memory and calibration data backup. (Recommended replacement every three years. *The battery should only be replaced by a GW Instek approved service center.		
Memory	100 blocks of memory		
Display	240X128 dot matrix C.C.F.L. back lit LCD (contrast adjustable)		
Test voltage	LCR-817/819/827/829/821 LCR-816/826 5mV–1.275V (5mV steps) 0.1V–1.275V (5mV steps) Note: When the test frequency is at 200kHz, test voltage must be greater than 100mV.		
DC bias	Internal	2V	
	External	Up to 30VDC (200mA max), tolerable up to 35VDC.	
Operation Environment	Indoor use Altitude up to 2000M Installation category II Pollution degree 2 Operating temperature 10°C–50°C, <85% relative humidity		
Storage Environment	-20°C–60°C		

Capacitance (C)

Series diagram

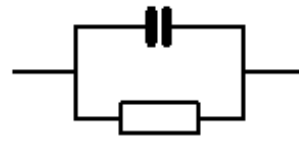


Series formula

$$C_S = C_P(1 + D^2)$$

D=dissipation factor

Parallel diagram



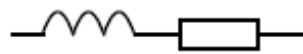
Parallel formula

$$C_P = \frac{C_S}{(1 + D^2)}$$

D=dissipation factor

Inductance (L)

Series diagram

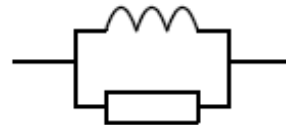


Series formula

$$L_S = \frac{L_P}{\left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)}$$

Q=quality factor

Parallel diagram



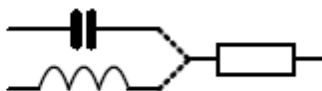
Parallel formula

$$L_P = L_S \left(1 + \frac{1}{Q^2}\right)$$

Q=quality factor

Resistance (R)

Series diagram

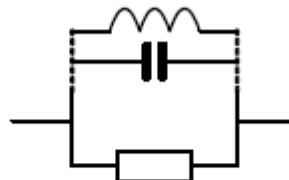


Series formula

$$R_S = \frac{R_P}{(1 + Q^2)}$$

Q=quality factor

Parallel diagram



Parallel formula

$$R_P = R_S(1 + Q^2)$$

Q=quality factor

ŽIVOTOPIS

Mario Srnović rođen je 10. svibnja 1980. g. u Osijeku. Nakon završene osnovne i srednje škole upisuje stručni dodiplomski studij na tadašnjem Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku pri Veleučilištu u Požegi. Uspješno diplomira na temu „Digitalni modulacijski postupci“ i stječe zvanje ing. elektronike. Nakon regulirane vojne obaveze, 2004. g. zapošljava se u „Kladionici Žderić“ na mjestu računalnog operatera. Od 2008. g. zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku na mjestu višeg laboranta na Zavodu za elektrostrojarstvo. U međuvremenu rješava razlikovne obveze te upisuje diplomski studij smjera Komunikacije i informatika.